

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: 2303T002 Strojírenská technologie

Zaměření: Obrábění a montáž

Analýza vlivu povlaků na trvanlivost odvalovací frézy a drsnost boku zubů při odvalovacím frézování ozubených kol pro firmu WIKOV MGI, a. s.

Analysis of the impact of coatings on the durability of hobs and the side teeth roughness during gear hobbing for the company WIKOV MGI, a.s.

KOM - 1217

Bc.Petr Kozák

Vedoucí práce:

Prof. Ing. Alexey POPOV, DrSc.

Konzultant:

Martin Gult – Wikov MGI

Počet stran: 68

Počet příloh a tabulek: 12

Počet obrázků: 42

Počet modelů nebo jiných příloh: 0

Meziměstí 2013

Abstrakt

Stručný popis výroby ozubení a technologií pro výrobu, trvanlivosti nástrojů a jejího výpočtu, povlakování a technologií povlakování, drsnosti povrchu a jejího hodnocení a měření. Volba operace a povlaků pro experiment. Grafické zhodnocení průběhu opotřebení odvalovacích fréz a drsnosti boku zubu obrobku při odvalovacím frézování při použití různých druhů povlaků. Ekonomické zhodnocení použití jednotlivých povlaků. Celkové zhodnocení použití povlaků při výrobě obrobku.

Abstract

Brief description of gear production and manufacturing technologies of gear production, tool life and its calculations, coating and coating technologies, surface roughness and its evaluation and measurement. Choosing of operations and coatings for experiment. Graphical evaluation of wear development on hobs and surface roughness of tooth flank during hobbing using different types of coatings. Economical evaluation of the use of chosen coatings. Overall evaluation of chosen coatings used in the manufacture of workpiece.

Klíčová slova

Ozubení, ozubené kolo, odvalovací frézování, odvalovací fréza, trvanlivost, drsnost

Keywords

Gear, cog wheel, hobbing, hob, tool life, surface roughness

Prohlášení

Byl jsem seznámen a tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci, *datum*

vlastnoruční podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat celé mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou nejen při psaní této práce, ale také v celém dosavadním studentském životě. Velké poděkování Jiřímu Kašparovi, který mi byl vzorem i mentorem.

Děkuji tímto Prof. Ing. Alexey Popovovi, DrSc. za věcné připomínky a vedení při vytváření této práce.

Speciální poděkování panu Martinu Gultovi z firmy Wikow MGI a.s., za výbornou spolupráci, bez něho by tato práce nevznikla.

Obsah

Úvod	9
1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení, strojích a nástrojích pro výrobu ozubení a odvalovacím frézováním.....	10
1.1 Základní pojmy	10
1.2 Technologie výroby ozubených kol.....	11
1.2.1 Výroba čelního ozubení	12
1.2.2 Odvalovací způsob	14
1.3 Dokončovací operace výroby čelních ozubených kol	16
1.4 Odvalovací frézování	18
1.4.1 Charakteristika technologie.....	18
1.4.2 Princip a kinematika odvalovacího frézování	18
1.4.3 Nástroj – odvalovací fréza	20
1.4.4 Stroj – odvalovací frézka	22
2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění, délkové charakteristiky otupení břitu obráběcího nástroje, Taylorův vztah.	24
2.1 Definice pojmů	24
2.1.1 Opotřebení nástroje a jeho příčiny	24
2.1.2 Typy opotřebení nástroje	26
2.1.3 Kritéria opotřebení	28
2.1.4 Metody stanovení opotřebení nástroje	29
2.1.5 Opotřebení v čase	30
2.2 Trvanlivost a životnost nástroje	31
2.2.1 Trvanlivost	31
2.2.2 Taylorův vztah	31
2.2.3 Životnost	32
2.3 Vlivy na trvanlivost a životnost	33
2.3.1 Řezné podmínky	33
2.3.2 Materiál nástroje a materiál obrobku	33
2.4 Zkoušky trvanlivosti	34
2.4.1 Krátkodobé zkoušky	34
2.4.2 Dlouhodobé zkoušky.....	35

3 Shrnutí poznatků o povlakování nástrojů, typech povlaků a jejich vliv na trvanlivost nástrojů.	36
3.1 Povlaky obecně	36
3.2 Metody povlakování	37
3.2.1 Úpravy před nanášením povlaků.....	37
3.2.2 Metoda PVD	37
3.2.3 Metoda CVD	38
3.2.4 Další metody	39
4 Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu	40
4.1 Definice pojmů	40
4.2 Parametry drsnosti	40
4.3 Filtrace povrchu	42
4.4 Měření drsnosti	42
4.4.1 Kontaktní měření drsnosti.....	43
4.4.2 Bezkontaktní měření drsnosti.....	43
5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti boku zubu při odvalovacím frézování vybrané součásti v dílnách firmy WIKOV MGI,a. s.	45
5.1.1 Obrobek – ozubené kolo	45
5.1.2 Nástroj – odvalovací fréza	46
5.1.3 Stroj – odvalovací frézka TOS OFA 32 CNC 6.....	47
5.2 Povlaky nástroje.....	48
5.3 Řezné podmínky	49
5.4 Metodika zkoumání trvanlivosti odvalovací frézy	49
5.4.1 Inspekční list	49
5.4.2 Měření opotřebení nástroje	50
5.4.3 Měření drsnosti boku zubu.....	51
6 Praktická část	53
6.1 Výsledky naměřených opotřebení v závislosti na povlaku.....	53
6.1.1 Povlak AlCrN.....	53
6.1.2 Povlak TiSiN.....	55
6.1.3 Povlak TiAlN	56
6.2 Výsledky naměřených drsností v závislosti na opotřebení nástroje	58

6.2.1 Povlak AlCrN.....	58
6.2.2 Povlak TiSiN.....	59
6.2.3 Povlak TiAlN	60
6.3 Ekonomické zhodnocení použití povlaků.....	61
Zhodnocení a závěr	64

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka / symbol	Jednotka	Popis
CNC	-	Číslicové řízení pomocí počítače
CVD	-	Chemická metoda deponování
DLC	-	Uhlík podobný diamantu
HRC	Mpa	Tvrdost podle Rockwella
HSS	-	Rychlořezná ocel
MT-CVD	-	CVD za středních teplot
MWPCVD	-	CVD aktivovaná mikrovlnami
PECVD	-	CVD aktivovaná plasmou
PVD	-	Metoda fyzikálního napařování
Ra	μm	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rq	μm	Průměrná kvadratická úchylka profilu
SK	-	Slinutý karbid
S-N-O-P	-	Stroj-nástroj-obrobek-přípravek
VBD	-	Vyměnitelná břitová destička
a_p	mm	Hloubka řezu
β_0	°	Úhel sklonu profilu zubu
C_T	-	Konstanta Taylorova vztahu
C_v	-	Konstanta Taylorova vztahu
f	mm.ot^{-1}	Přísuv
f_o	mm.ot^{-1}	Přísuv obrobku
h	m	Hloubka zubu (záběru)
m	-	Exponent Tylorova vztahu
n_o	ot.min^{-1}	Otáčky obrobku
q	-	Počet otočení VBD
T	min	Čas
v_c	m.s^{-1}	Řezná rychlost
v_n	m.s^{-1}	Rychlost pohybu nástroje
v_z	m.s^{-1}	Vratná rychlost obrážení
x	-	Počet možných přestřžení nástroje
z	-	Počet chodů odvalovací frézy
z_o	-	Počet zubů obráběného kola
α	°	Sklon přímky v log. souřadnicích
η	°	Úhel naklopení odvalovací frézy
λ	-	Filtr povrchu
ω	°	Úhel stoupání šroubovice odval. frézy

Úvod

Mechanismy různého provedení jsou známy již od starověku, od jednoduché páky, přes klikové mechanismy až po současné složité mechanismy miniaturního provedení i kolosální stroje. Základním principem mechanismu je převod nebo transformace energie na vstupu ve chtěný výstupní impuls. A právě ozubené kolo je jednou z možností přenosu momentu síly i změny jeho osy. Již ve starověkém Řecku byla používána ozubená kola, čemuž odpovídá i mechanismus z Antikythéry, miniaturní a složitá soustava ozubených kol určená pro sledování pohybu Slunce a Měsíce. Poté ozubená kola na dlouhou dobu zmizela z dějin, dokud je nevyzvedl všestranný vynálezce Leonardo da Vinci. Největší vývoj nastal během průmyslové revoluce v 18. století. Od té doby je stálá snaha tento mechanismus zlepšovat, například snižováním hlučnosti, zvyšováním výkonu, přesnosti a životnosti nebo modifikací velikosti a tvarů.

Ale i ozubené kolo je potřeba vyrobit. Technologie výroby se vyvíjela s časem, s narůstajícími požadavky na parametry ozubení a dle možností výrobních strojů a neméně byla závislá i na materiálech nástrojů pro výrobu ozubení. Ať už se jednalo o odlévání ozubených kol, výrobu ozubení tzv. zub po zubu nebo o nejmladší technologii odvalovacího frézování, vždy byla snaha technologii zrychlit, zlepšit přesnost a snížit náklady. Již od počátku tohoto vývoje se vytvářela smyčka – technologie zajistila vyšší možnosti řezných podmínek, ale těm už nestačily materiály nástrojů. S vynálezem nového materiálu bylo teprve možné technologie zlepšovat. V druhé polovině 20. století měl tento trend vývoje velice dynamický průběh, který v současnosti sice trochu polevuje, ale stále jsou rezervy pro nový vývoj.

Moderní společnost je založená převážně na ekonomii, proto se klade velký důraz na snižování nákladů. Z pohledu technologie je to možné především snižováním hlavních a vedlejších časů operací. U samotného nástroje se snížení nákladů docílí optimalizací jeho trvanlivosti – schopnosti obrábět co nejdelší dobu. A právě vývoj materiálů nástroje byl jedním z důvodů zvýšení trvanlivosti a možnosti zvýšit řezné podmínky, díky čemuž se podařilo snížit časy operací, a tím i náklady. Když už se zdálo, že na samotném materiálu nástroje není možno nic zlepšit, objevily se povlaky. Vrstvy mikroskopických tlouštěk na nástroji, které byly schopné zvýšit trvanlivost i několikanásobně a řezné podmínky i o 50%.

Tato práce je zaměřena na shrnutí výroby čelních ozubených kol, které jsou základem těchto mechanismů a jsou i konkrétním případem touto popisovaného experimentu, dále obsahuje shrnutí poznatků o trvanlivosti nástrojů a drsnosti povrchů a jejich měření. Stručně je popsána i technologie povlakování a historie povlaků. V experimentální části práce jsou popsány zkoušky trvanlivosti nástroje povlakované třemi různými povlaky od firmy CzechCoating, s.r.o., která provádí povlakování nástrojů pro firmu Wikov M.G.I.. Součástí experimentu je zároveň i vliv povlaků na drsnosti obrobeného povrchu ozubeného kola. Na závěr je provedeno ekonomické zhodnocení použití u těchto tří povlaků.

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení, strojích a nástrojích pro výrobu ozubení a odvalovacím frézování

1.1 Základní pojmy

Ozubená kola jsou jeden ze základních způsobů přenosu otáčivého pohybu a krouticího momentu v technických zařízeních a strojích. Tento přenos je prováděn pomocí kinematické a silové vazby mezi hnacím a hnaným členem. Ozubení dvou kol do sebe vzájemně zapadají a tím vzniká vazba na principu záběru s přímým dotykem obou spoluzabírajících členů, tedy vytvoří se jednoznačný přenos pohybu a krouticího momentu. Takto do sebe zapadající ozubená kola nazýváme soukolí.^[1]

Většina soukolí a ozubených převodů má velkou účinnost, proto se jedná o nejčastěji používané převody.

Výhody tohoto mechanismu:^[1]

- Relativně malé rozměry
- Přesné dodržení převodového poměru
- Schopnost přenosu velkých výkonů při optimálním převodu do 50 m.s^{-1}
- Při malých přenášených výkonech možnost dosáhnout extrémních otáček
- Schopnost relativně vysokých převodů
- Možnost krátkodobé přetížitelnosti
- Malá náročnost na údržbu a vysoká životnost

Nevýhody:^[1]

- Složitější a dražší výroba
- Nároky na přesnost uložení a tuhost soukolí
- Vznik hluku a chvění
- Malé osové vzdálenosti

Druhy ozubených soukolí

Při tvorbě ozubení se především používá bok zubů ve tvaru evolventy. Evolventa vzniká jako dráha bodu na přímce, která se odvaluje po kružnici. Tento tvar zajišťuje konstantní dotyk zubů a tím i přenos pohybu a krouticího momentu.^[1]

Základní dělení ozubených soukolí:^[1]

Podle tvaru soukolí

- Čelní soukolí
- Kuželové soukolí
- Šroubové soukolí
- Šnekové soukolí
- Hypoidní soukolí

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

Podle tvaru boční čáry

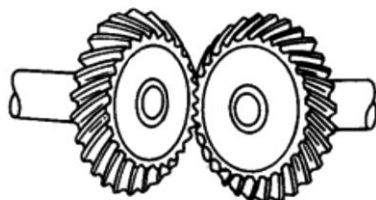
- Přímé zuby
- Šikmé zuby
- Dvojitě šikmé (tzv. šípové)
- Zakřivené zuby
- Šroubové zuby

Podle vzájemné polohy os

- Rovnoběžné osy (čelní soukolí – vnitřní i vnější ozubení)
- Různoběžné osy (kuželová soukolí s různými úhly os)
- Mimoběžné osy (šroubová, šneková a hypoidní soukolí)



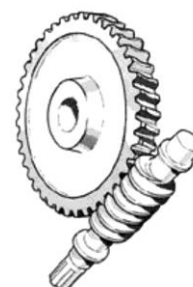
Čelní soukolí



Kuželové soukolí



Šroubové soukolí



Šnekové soukolí

Obr. 1: Druhy ozubených soukolí^[2]

1.2 Technologie výroby ozubených kol

Výroba ozubených kol patří k nejnáročnějším technologickým procesům. Pro výrobu přesně definovaného tvaru boku zubu je potřeba speciální nástroj a použití speciální technologie. Typ možné technologie pro výrobu ozubeného kola se liší podle velikosti a druhu ozubení, volené přesnosti ozubení a také na možnostech výroby firmy. Těžká a velká ozubená kola se můžou odlít i s ozubením a následně povrchově obrobít pro přesnost.

Podle dosažené přesnosti základních hodnot a podle jakosti obrobených zubních ploch lze metody obrábění a stroje rozdělit na ^[3]:

- nejpřesnější - zuby se frézují, obrážejí nebo hoblují, pak brousí, ševingují nebo zaběhávají,
- středně přesné - zuby se frézují, obrážejí nebo hoblují na strojích pracujících odvalem,
- méně přesné - zuby se frézují tvarovými modulovými frézami dělicím způsobem.

Technologie používané pro výrobu ozubení jsou frézování, obrážení a protahování. Jednotlivé technologie se volí podle tvaru zubu, velikosti ozubení a produktivity.

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

1.2.1 Výroba čelního ozubení

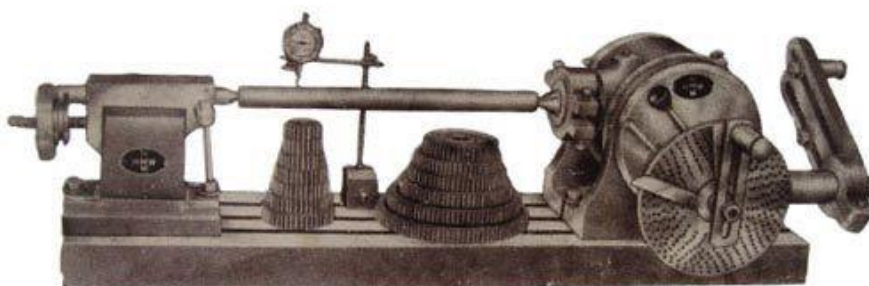
Při výrobě se používají dva základní principy – dělicí a odvalovací způsob.

1.2.1.1 Dělicí způsob

Základní způsob výroby ozubených kol. Nástroj koná přímočarý vratný pohyb, obrobek se nehýbe. Každá zubová mezera je obráběna nástrojem samostatně. Nástroj má tvar zubové mezery a ten se kopíruje na obrobek. Po obrobení se obrobek – ozubené kolo, pootočí o vzdálenost, resp. úhel, zubové mezery a proces se opakuje.

Pro otáčení kola o vzdálenost jedné zubové mezery se používá přípravek – dělicí přístroj. Dělicí přístroj je upnut na stůl stroje, a mezi hroty přípravku je upnutý obrobek. Na čele univerzálního dělicího přístroje je deska se sadou otvorů na různých průměrech. Kliky pohání řadu soukolí uvnitř přípravku, výsledkem je pootáčení výstupní hřídele o zvolené díly. Do dělicího přístroje je možné upevnit více stejných obrobků najednou.^[4]

Pro výrobu šikmého ozubení je potřeba dělicí přístroj připojit i na posuvný šroub stolu, aby šroubovice probíhala v celé délce ozubeného kola ve stejném úhlu.^[5]



Obr. 2: Univerzální dělicí přístroj

Jak bylo řečeno v kapitole 1.1, evolventa je vytvořena dráhou bodu na přímce, která se odvaluje po kružnici určitého průměru. Z toho vyplývá, že nestačí, aby měl nástroj vhodný modul, ale také vhodný tvar evolventy pro daný průměr a počet zubů. Pro výrobu určitého ozubeného kola, s hodnotami d , m a z , by bylo nutné mít speciální nástroj, který bude mít tvar přesné zubové mezery pro tyto hodnoty.

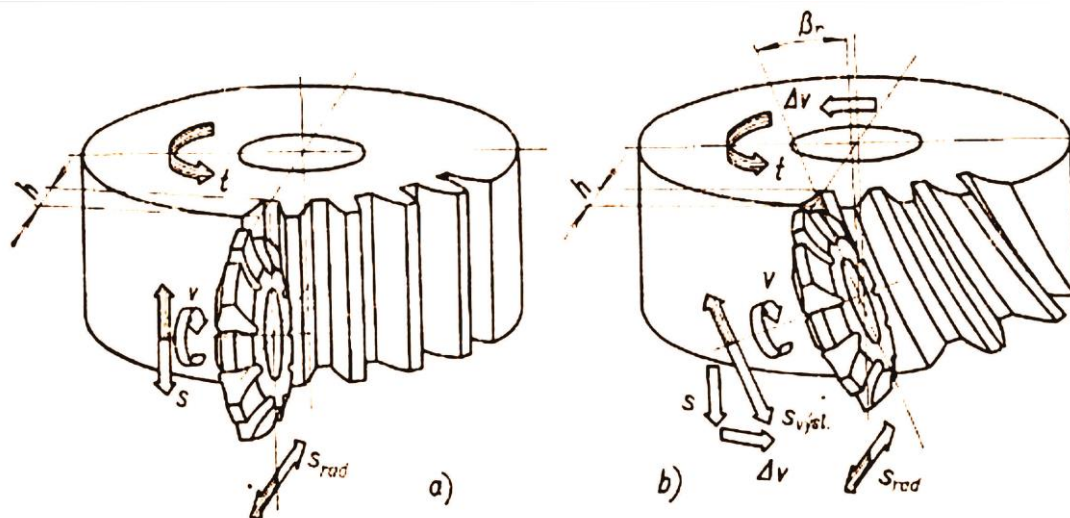
Frézování

Jednou možností jak frézovat čelní ozubení je kotoučovou modulovou frézou. Fréza má břity ve tvaru zubové mezery, obrobek je upevněn v dělicím přístroji na stole stroje a pohybuje se proti kotoučové fréze. U menších modulů je zub vyfrézován na jeden záběr frézy, u větších modulů se většinou nejprve vyhrubuje a poté se dalším záběrem dodělá načisto. Po vyfrézování zubové mezery se dělicí přístroj otočí o další mezeru a proces se opakuje.^[3]

I pro kotoučové modulové frézy platí, že pro každý rozdílný rozměr ozubeného kola je potřeba mít určitý nástroj. Kvůli hospodárnosti ale jsou modulové frézy používány v sadách,

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

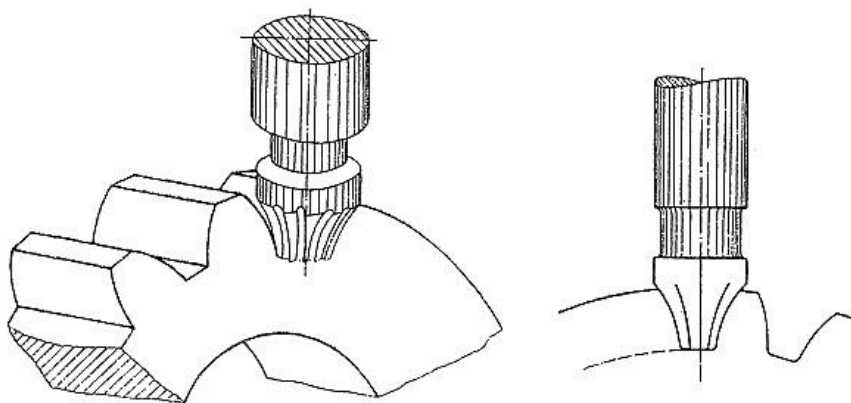
kdy u menších modulů je pro každý typ modulu osmičlenná sada a u větších sada patnáctičlenná. Kdy každý člen je používaný pro určitý rozsah počtu zubů.^[3]



Obr. 3: a) přímé zuby kotoučovou frézou, b) šikmé zuby kotoučovou frézou^[5]

Další možností jak frézovat dělicím způsobem čelní ozubení je stopkovou modulovou frézou. Princip frézování je stejný jako u kotoučové modulové frézy. Stopková fréza se používá pro výrobu ozubených kol s šípovými zuby, které by kotoučovou frézou nebylo možné vyrobit. Při frézování stopkovou frézou vzniká nebezpečí ohybu nástroje ve stopce, proto je nutné volit nízké rychlosti posuvu.

Tento způsob výroby ozubených kol se hodí pro kusovou výrobu a malé série. Výhodou frézování ozubení dělicím způsobem je, že je ho možné provádět na konvenčních frézkách. Celkově je však frézování dělicím způsobem velice nepřesné, protože dělicí přístroj nemusí být úplně přesný a při vnesení odchylky u jedné zubové mezery se tato odchylka šíří i dalšími zuby. Nástroj také nemusí mít přesný tvar zubové mezery, protože bude ze sady, která má pouze přibližný tvar, ale ne přesně vhodný. Proto ozubená kola vyrobená dělicím způsobem nejsou vhodná pro rychlosti nad 5 m.s^{-1} .^[5]



Obr. 4: Frézování stopkovou frézou^[3]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

Obrázení

Pro obrázení čelního ozubení se používá nůž ve tvaru zubové mezery. Obrobek je upnut na stole obrážeky, u které je otáčení napojeno na dělicí přístroj a tím je zajištěno otáčení obrobku o zubovou mezeru, nebo je dělicí přístroj upnut přímo na stůl obrážeky. Obrázením je možno vyrábět jak vnější, tak vnitřní ozubení. Tato metoda není příliš produktivní a opět dělicí přístroj může zavádět chyby v otočení.

Protahování

Protahování čelních ozubených kol se provádí protahovacím trnem, nebo kruhovým protahovacím nástrojem. Protahovací trn má první zuby v hrubém tvaru zubové mezery a poslední zuby jsou již kalibrační s tvary evolventy boku zubu. Tímto způsobem se obrábí především vnitřní ozubení. Jedná se o velice produktivní metodu, však použitelnou pouze v sériové výrobě, protože nástroje pro protahování jsou velice drahé.^[6]

1.2.2 Odvalovací způsob

Odvalovací způsob obrábění ozubených kol má mnohem větší přesnost výroby a vyšší produktivitu. Způsob je založený na tvorbě ozubení složeným pohybem nástroje i obrobku - odval. Nástroj může vykonávat vratný pohyb, nebo rotační a obrobek koná rotaci, kterou se postupně posouvá zubová mezera podél nástroje. Způsob v podstatě kopíruje odvalování budoucího soukolí, díky tomu jsou dodrženy přesné rozměry.

Frézování

Odvalovací frézování bude podrobně popsáno v kapitole 1.5.

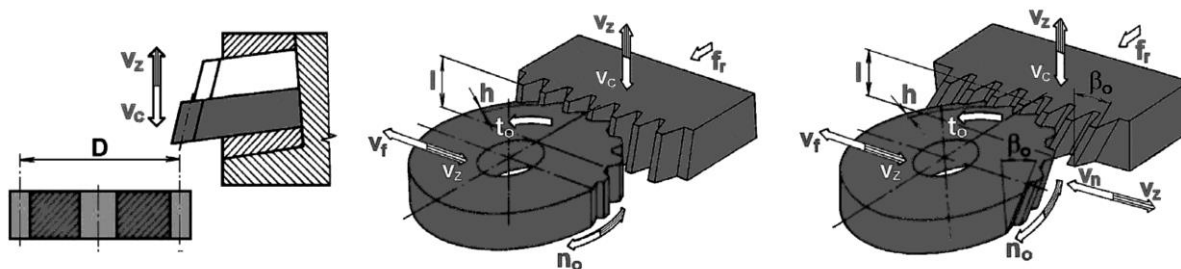
Obrázení

Prvním způsobem odvalovacího obrázení je obrázení hřebenovým nožem. Tento způsob se jinak nazývá MAAG. Hřeben má lichoběžníkový profil a modul souhlasný s vyráběným ozubeným kolem (viz. Obr. 5). Nástroj koná přímočarý vratný pohyb ve směru v_z , kdy obrábí více zubů hřebenu najednou v celé hloubce zubu h . Odvalování n_o není plynulé, k posuvu nástroje nebo obrobku ve směru v_f dochází vždy v horní úvrati nástroje. Evolventa boku zubu tak není plynulá, ale tvoří ji jednotlivé přímky závislé na posuvu nástroje a obrobku.

Při obrázení šikmého ozubení je nutné sklopit hřeben, resp. smykadlo stroje, o úhel ozubení β_o , nebo použít hřeben s vytvarovaným profilem pod úhlem β_o . Při použití hřebenu s vytvarovaným profilem pod úhlem β je nutné spojit přímočarý pohyb nástroje s posuvným ve směru v_n , aby se docílilo obrobení celé šroubovice ozubení.

Hřebenový nůž má určitý počet zubů, kterými dokáže obrábět. Při přejetí celého nástroje obrobkem se hřeben (nebo obrobek) posune do startovací polohy, kterou měl před začátkem obrábění. Proces se opakuje, dokud není celé ozubené kolo obrobeno.

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení



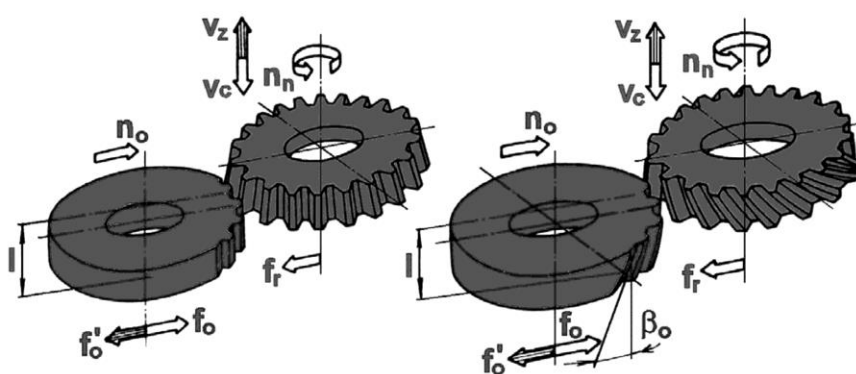
Obr. 5: Obrážení hřebeným nožem ^[7]

Obrážení hřebenovým nožem patří k nejpřesnějším metodám výroby ozubení a náklady na nástroj jsou nízké. Pro výrobu je možné použít konvenční obrážedky. Výroba je však časově náročná, protože čas návratu do horní úvratí zdvojnásobuje strojní čas. ^[7]

Další typ je metoda obrážení kotoučovým nožem, jinak nazývaný FELLOWS. Princip je podobný jako u metody MAAG, akorát místo hřebenového nože je nástroj ve tvaru spoluzabírajícího ozubeného kola. U této metody se odvaluje jak obrobek, tak i obrážecí nástroj, tím se postupně přenáší evolventa zubů na nástroj na obrobek.

Před zahájením obrábění je nástroj odsunutý od okraje obrobku a po zahájení obrábění se nejprve provede vřezání nástroje radiálním přísuvem k obrobku f_r , dokud nástroj nedosáhne hloubky zubu h . Poté se zapne společný odval kol n_n a n_o . Krokové otáčky nástroje a obrobku musí být správně nastaveny, aby odpovídaly poměru jejich velikosti neboli převodovému poměru. Při zpětném chodu nástroje se obrobek oddálí od nástroje přísuvem f_o , aby se břity nástroje netřely o obrobenou plochu. ^[7]

Šikmé zuby jsou obráženy pomocí sklopeného nástroje s přímými zuby. Sklopení obrážecí hlavy odpovídá úhlu ozubení β_o . Nebo má kotoučový nůž zuby sklopené o úhel β_o . Je nutné spojit přímočarý pohyb nástroje zároveň s rotačním, aby byla obrobena šroubovice na ozubeném kole.



Obr. 6: Obrážení kotoučovým nožem ^[7]

Oproti metodě MAAG má kotouč zuby na celém obvodu a proto je možné obrobit celý obvod ozubeného kola bez přerušení a přestavení nástroje. Tím se ušetří strojní čas. Pro obrážení kotoučovým nástrojem je zapotřebí speciální odvalovací obrážedka. Nevýhody jsou však stejné jako u MAAGu, kdy se strojní čas protahuje o zpětný chod nástroje. ^[7]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

1.3 Dokončovací operace výroby čelních ozubených kol

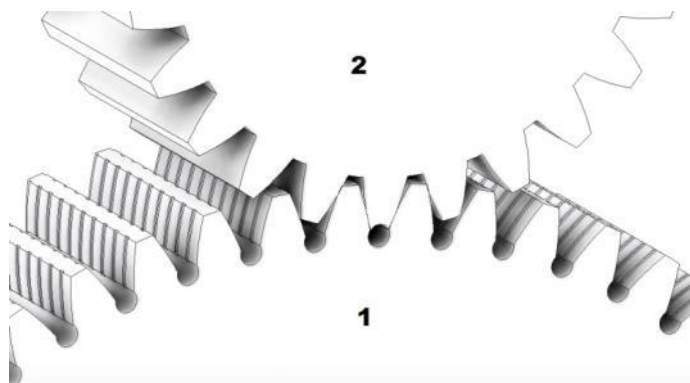
Dokončovací operace provádějí pro dosažení vysokých kvalit boků zubů a vysoké přesnosti rozměrů ozubených kol. Provádí se po dělicích způsobech výroby ozubených kol a po odvalovacím obrázení, po těchto operacích jsou jednotlivé zuby tvořeny přímkami po nástroji. Díky tomu nemusí být chod ozubení klidný a způsobovat chvění a být hlučné. Mezi základní metody patří ševingování, broušení, zaběhávání a lapování.

Ševingování

Dokončování boků zubů pomocí speciálního nástroje, tzv. ševingovacího kola, které odebírá jemnou třísku a zajišťuje přesný geometrický tvar boku zubu. Ševingovací kolo má tvar spoluzabírajícího kola, kdy na bocích zubů jsou drážky, které slouží jako jednotlivé břity.

Nástroj a ozubené kolo jsou upevněny jako spoluzabírající soukolí. (viz. Obr.7) Ševingovací kolo (1) funguje jako hnané kolo a obráběné ozubené kolo (2) je lehce bržděno. Obrábění je pak docíleno přídavným pohybem ševingovacího kola, který je rovnoběžný s osou obráběného kola u podélného ševingování, nebo je osa obrobku sklopena ke směru pracovního stolu, pak se jedná o ševingování diagonální.^[6]

Tato metoda je především používána pro kola, která nebyla tepelně zpracována.



Obr. 7: Ševingování

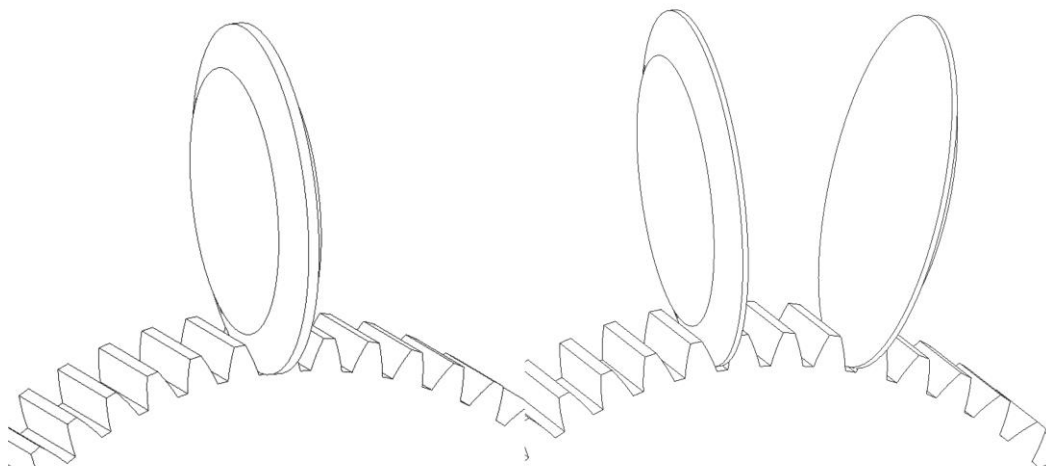
Broušení

Broušení se provádí u ozubených kol, které byly tepelně zpracovány. Nejčastěji se používá u ozubených kol s kalenými boky zubů. Hlavní 3 způsoby jsou:^[6]

- Dělicím způsobem tvarovými kotouči
- Dělicím způsobem s odvalem boku zubu
- Odvalovacím způsobem šnekovým brousícím kotoučem

U broušení tvarovými kotouči jsou buď dva kotouče ve tvaru boku zubu proti sobě a obrábějí se dva boky najednou, nebo je pouze jeden kotouč ve tvaru zubové mezery a obrousí se oba boky zubové mezery najednou. Ozubené kolo je upnuto v dělicím přístroji a po obroušení boků zubů je kolo pootočen o jednu rozteč. Broušení tvarovými kotouči je nejproduktivnější způsob broušení, ale nejméně přesný. Zároveň je potřeba mít, jako u výroby ozubených kol dělicím způsobem, nástroje pro jednotlivé moduly a počty zubů.^[7]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení



Obr. 8: Broušení dělicím způsobem tvarovými kotoúči

U odvalu boku zubu se napodobuje odvalování ozubeného kola po ozubeném hřebenu. Brousící kotoúč má tvar jednoho zubu hřebenu – princip Niles, nebo je zub nahrazen dvěma brousícími kotoúči, které svírají úhel boků zubu hřebenu – princip Maag. U obou principů je spojen posuv suportu s rotací obrobku. Obrobek se odvalí přes brusný kotoúč a tím se vytváří pohyb po evolventě. Po přebroušení celé zubové mezery se nastaví na speciálním přípravku další zubová mezera a proces se opakuje. Pro princip Maag je zapotřebí speciální typ brusky.

Odvalovací způsob broušení je podobný odvalovacímu frézování (viz kap.1.5), kdy pro broušení je použit brusný šnek, který má požadovaný profil broušeného ozubení – princip Reishauer. Šnek může být jednochodý, či dvouchodý. Pro přesné broušení je potřeba věnovat pozornost přesné synchronizaci otáček ozubeného kola a šneku a zároveň i statickému a dynamickému vyvážení kotoúče. Pro malé moduly je možné odvalovacím broušením obrábět ozubená kola z plného materiálu.^[7]



Obr. 9: Broušení odvalovacím způsobem

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

Zaběhávání

Pro jemné zlepšení drsnosti boku zubu se také používá metoda zaběhávání, kdy mezi spoluzabírající kola soukolí je přiváděn olej s jemným brusivem a tím se vzájemně obrušují boky zubů. Tento způsob se používá především pro snížení hlučnosti soukolí u kol s tepelným zpracováním.^[6]

Lapování

Lapování je metoda, která by se dala přirovnat kombinaci ševingování a zaběhávání. Nástrojem je přesné ozubené kolo z litiny, které má stejný modul, jako má ozubené kolo. Lapovací nástroj je poháněn a ozubené kolo je lehce bržděno, zároveň je mezi kola přiváděna lapovací pasta. Nástroji je udělen kmitavý pohyb. Tímto způsobem jsou obráběny především ozubená kola s kalenými boky zubů. Je dosaženo nízké drsnosti při zachování stejné evolventy.^[6]

1.4 Odvalovací frézování

1.4.1 Charakteristika technologie

Odvalovací frézování patří k nejpresnějším a nejproduktivnějším metodám výroby čelního evolventního ozubení. Ve většině případů není potřeba po odvalovacím frézování zapotřebí dokončovací operace, protože drsnost boku zubů je dostatečně nízká. Jednou z nejdůležitějších výhod je, že jedním nástrojem určitého modulu je možné obrobít ozubená kola o libovolném počtu zubů jak přímých, tak šikmých. Také je možnost nastavení korekce. Pokud se shoduje velikost frézy a modul se šnekem, je možné i obrábět šneková kola pro toto šnekové soukolí. Odvalovací frézování je možné použít také pro výrobu řetězových kol a drážkování na hřídeli při použití speciální odvalovací frézy.^[9]

1.4.2 Princip a kinematika odvalovacího frézování

1.4.2.1 Princip odvalovacího frézování

Princip je založen na kontinuálním odvalování nástroje – odvalovací frézy a obrobku – ozubeného kola. Je napodoben pohyb šnekového soukolí s rozdílem, že u frézování je potřeba pohánět obě kola, tedy nástroj a obrobek. Na rozdíl od dělicího způsobu obrábění je u odvalovacího frézování stále více zubů v záběru. Odvalovací fréza koná otáčivý pohyb kolem své osy a zároveň posun podélně s osou obrobku. Jednotlivé boky zubů se vytvářejí odvalem zubů frézy. S jedním otočením obrobku kolem své osy vykoná nástroj tolik otáček, kolik má mít výsledné kolo zubů, to je dáno z podmínky^[7]:

$$\frac{n_0}{n} = \frac{z}{z_0}, \quad (1)$$

kde: n_0 [min^{-1}] jsou otáčky obráběného ozubeného kola,

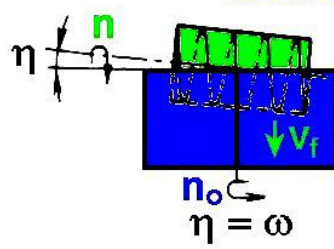
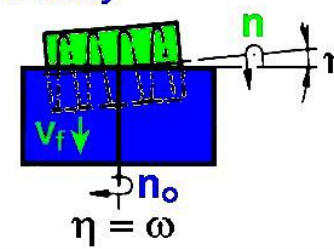
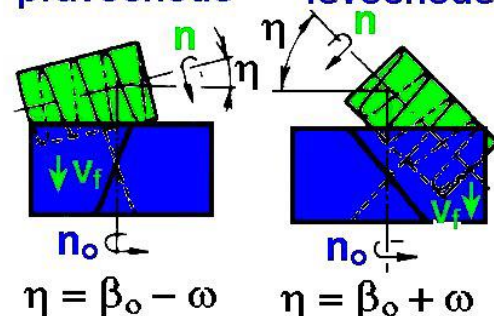
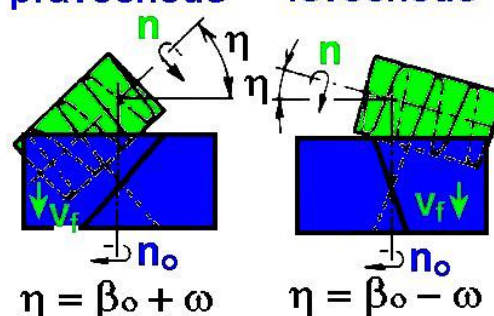
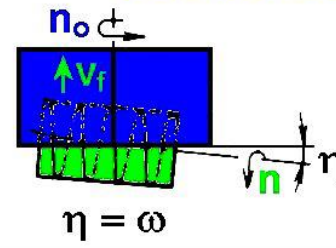
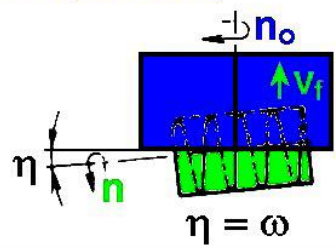
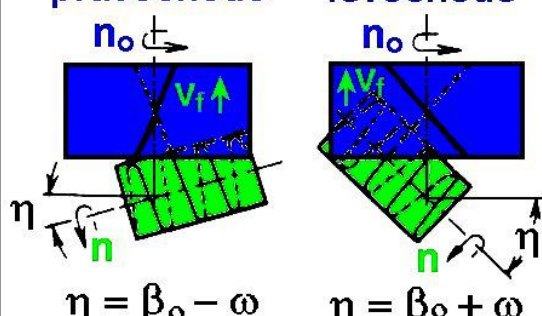
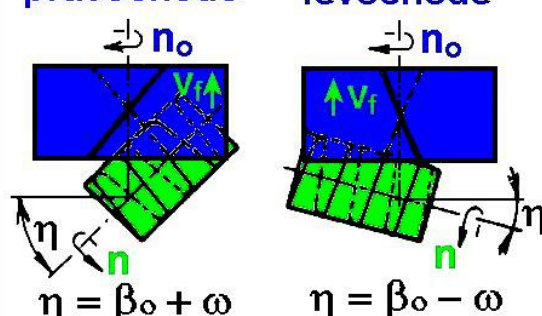
n [min^{-1}] jsou otáčky odvalovací frézy,

z_0 [-] je počet zubů obráběného ozubeného kola,

z [-] je počet chodů odvalovací frézy.

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

U menších ozubených kol se obrábí rovnou v plné hloubce zubu, u větších modulů se nejprve kolo hrubuje a poté je obrobeno načisto, nebo obroušeno. Jak se fréza otáčí, její zuby, které jsou srovnány stejně jako obrážecí hřebeny (viz kap. 1.2.2), postupně v kombinaci s odvalem obrobku tvoří obálku evolventy boku zubu. Tento proces se opakuje, dokud fréza nepřejde celou šířku ozubeného kola.

	Fréza pravochoďá	Fréza levochoďá
Frézování nesousledné	<p>Ozubené kolo s přímými zuby</p>  <p>n n_o $\eta = \omega$</p>	<p>Ozubené kolo s přímými zuby</p>  <p>n n_o $\eta = \omega$</p>
	<p>Ozubené kolo se šikmými zuby</p> <p>pravochoďé levochoďé</p>  <p>n n_o $\eta = \beta_o - \omega$ $\eta = \beta_o + \omega$</p>	<p>Ozubené kolo se šikmými zuby</p> <p>pravochoďé levochoďé</p>  <p>n n_o $\eta = \beta_o + \omega$ $\eta = \beta_o - \omega$</p>
Frézování sousledné	<p>Ozubené kolo s přímými zuby</p>  <p>n_o V_f n $\eta = \omega$</p>	<p>Ozubené kolo s přímými zuby</p>  <p>n_o V_f n $\eta = \omega$</p>
	<p>Ozubené kolo se šikmými zuby</p> <p>pravochoďé levochoďé</p>  <p>n_o V_f n $\eta = \beta_o - \omega$ $\eta = \beta_o + \omega$</p>	<p>Ozubené kolo se šikmými zuby</p> <p>pravochoďé levochoďé</p>  <p>n_o V_f n $\eta = \beta_o + \omega$ $\eta = \beta_o - \omega$</p>

Obr. 10: Úhly nastavení odvalovací frézy^[7]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

Pro výrobu čelního ozubeného kola s přímými zuby je potřeba naklonit odvalovací frézu ve vřetení stroje o úhel stoupání její šroubovice na roztečném válci, smysl naklopení frézy je závislý na tom, jestli je fréza pravotočivá, nebo levotočivá. Tím se docílí při rotaci frézy rovnoběžný pohyb zubů frézy s osou obrobku a tím i řezání přímých zubů.^[7]

$$\eta = \beta_0 \pm \omega, \quad (2)$$

kde: β_0 [°] je úhel sklonu zubů obráběného ozubeného kola,

ω [°] je úhel stoupání šroubovice odvalovací frézy.

Při obrábění ozubených kol s šikmými zuby je potřeba ke sklonění frézy o úhel stoupání šroubovice přidat také zvolený úhel stoupání šikmých zubů.

1.4.3 Nástroj – odvalovací fréza

1.4.3.1 Obecný popis nástroje

Odvalovací fréza je mnohobřítý nástroj válcového tvaru, kterým se obrábí čelní evolventní ozubení. Jedná se o speciální nástroje a možné ho používat pouze pro operace odvalováním na odvalovacích frézách. Zuby frézy jsou uspořádány do šroubovice po obvodu frézy, nebo se dá popsat jako více řad ozubených hřebenů v normálové rovině po obvodu frézy, které jsou navzájem axiálně posunuty o stoupání šroubovice. Hlava a boky zubů jsou podsoustruženy, aby byly vytvořeny vhodné řezné úhly hřbetu. Čelo zubu bývá nejčastěji s 0° pro jednodušší broušení.

1.4.3.2 Konstrukce odvalovacích frézy

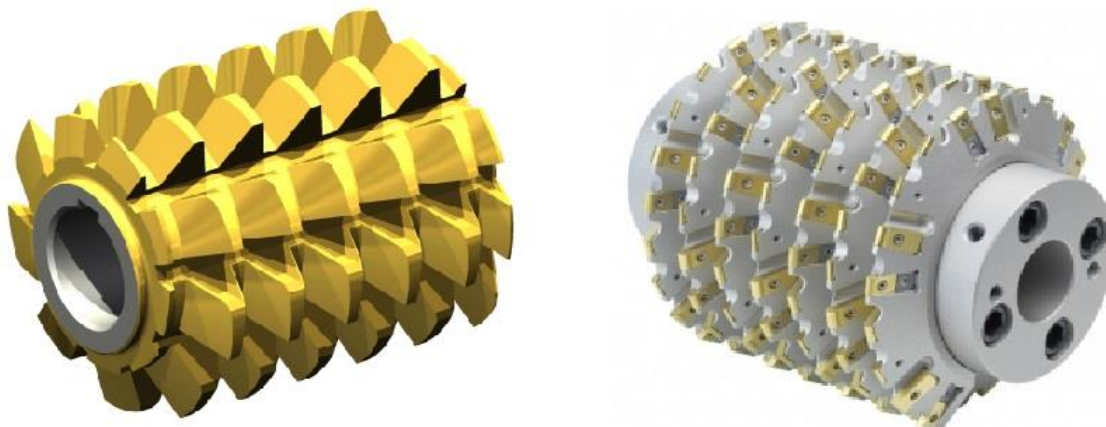
Odvalovací frézy z nástrojové oceli jsou většinou monolitní konstrukce. Jsou odsoustruženy z jednoho kusu, nebo jsou vyráběny práškovou metalurgií a následně dokončeny soustružením. Tento typ frézy je nejpoužívanější díky jednoduchosti a rozšířenosti výroby. Životnost nástroje je však omezen počtem přebroušení.^[9]

S nástupem destiček z SK se začaly vyvíjet nové konstrukce fréz, kdy na těle frézy z nástrojové oceli byly vyfrézovány místa pro upnutí destiček. Destičky z SK zajistily vyšší řezné rychlosti a životnost byla omezena pouze na životnost destiček, životnost těla nástroje se dá říct, je neomezená.^[9]

Nejnovější konstrukce odvalovacích fréz má modulovou strukturu. Hlavní část je tělo nástroje válcového tvaru a moduly ve tvaru šroubovice, hřebenů nebo jednotlivých zubů. Na tyto moduly se pak přimontují destičky. To pomáhá ulehčit výrobu a je možné vyměnit jakýkoliv modul, pokud by došlo k poškození, namísto destrukce celého nástroje.^[9]

Důležitý parametr je také počet chodů odvalovací frézy. Stejně jako u šnekového kola se na odvalovací fréze může použít více šroubovic na obvodu nástroje. Počet chodů je důležitý pro výpočet otáček nástroje a obrobku ze vztahu (7).^[9]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení



Obr. 11: Odvalovací fréza z HSS (vlevo) a s modulovou konstrukcí s destičkami z SK (vpravo)

1.4.3.3 Materiály odvalovacích fréz

Díky složité konstrukci, náročné výrobě a přerušovanému obrábění je možnost použití materiálů pro výrobu frézy značně omezena.

První odvalovací frézy byly vyráběny z rychlořezné oceli, která obsahovala 18%W, 4%Cr a 1%V. V současnosti je velké množství různého složení rychlořezné oceli. Některé prvky zlepšují otěruvzdornost, další pak tepelnou stabilitu a tvrdost. V tabulce 1 jsou vypsány typy rychlořezných ocelí používaných v současné době pro výrobu odvalovacích fréz a jejich tvrdosti HRC.^[8]

	C [%]	Cr [%]	W [%]	Mo [%]	V [%]	Co [%]	HRC
CPM M2	1,0	4,2	6,4	5,0	2,0	-	64
ASP 2023	1,3	4,2	6,4	5,0	3,1	-	64
CPM M4	1,4	4,3	5,8	4,5	3,6	-	64
REX M4	1,3	4,3	5,9	4,9	4,1	-	64
CPM REX 54	1,45	4,3	5,8	4,5	3,6	5,3	65
CPM REX 45	1,3	4,1	6,3	5,0	3,1	8,3	66
ASP 2030	1,3	4,0	5,0	6,5	3,0	8,0	66
CPM T15	1,6	4,0	12,3	-	5,0	5,0	66
CPM REX 76	1,5	3,8	10,0	5,3	3,1	9,0	67
CPM REX 86	2,0	4,0	10,0	5,0	5,0	9,0	68
ASP 2060	2,3	4,0	6,5	7,0	6,5	9,0	68
CPM REX 121	3,3	3,8	10,0	5,3	9,0	9,0	70
M35V	1,2	4,1	6,0	5,0	3,0	5,0	66

Tabulka 1: Složení HSS ocelí a jejich tvrdost^[8]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

Velký rozvoj výměnných destiček ze slinutých karbidů a jejich možnost využití za vyšších rychlostí se také promítl do odvalovacího frézování. Díky složitosti konstrukce a velikosti nástroje není možné udělat celý nástroj z SK, proto je tělo nástroje vytvořeno z uhlíkové oceli a břitové destičky mají tvar buď celého profilu zubu hřebenu, nebo je profil složen z více destiček.

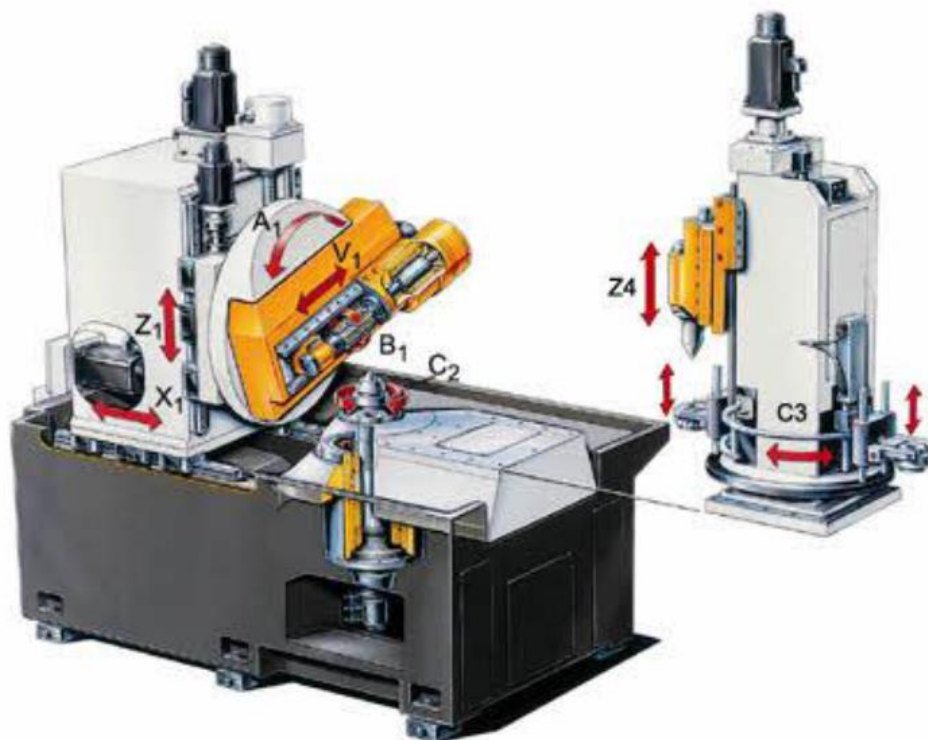
1.4.3.4 Krokování frézy

Při odvalovacím frézování je v řezu více zubů najednou, na kterých dochází k opotřebení. Odvalovací fréza však většinou má větší pracovní délku a při opotřebení jedné pracovní části nástroje se provádí tzv. překrokování. Fréza je axiálně posunuta o určitý úsek do další pracovní části, kde se již nenachází opotřebení. Počet překrokování frézy je závislé od délky pracovní části, ale také na typu operace (hrubování x načisto).

1.4.4 Stroj – odvalovací frézka

Odvalovací frézování je komplexní proces pohybů nástroje i obrobku, které je navzájem nutné dodržet pro správný průběh operace. U běžných typů frézek není možné zajistit rotační pohyb nástroje i obrobku, proto jsou používány speciální typy frézek – odvalovací frézky. První odvalovací frézka byla patentována v Saské Kamenici v Německu na konci 19. století. Pohon byl zajišťován klikou a přes převody poháněl nástroj i obrobek.^[8]

Odvalovací frézka se skládá ze dvou vřeten, jedno vřeteno slouží pro upnutí nástroje a druhé vřeteno pro upnutí obrobku. Nástrojové vřeteno má vodorovnou osu rotace a ve většině případů zajišťuje přísuv, posuv, natočení osy vřetene pro výrobu šikmého ozubení. Obrobkové vřeteno má svislou osu rotace a většinou zajišťuje pouze rotaci obrobku.



Obr. 12: Základní koncepce a kinematika odvalovací frézky^[9]

1 Shrnutí poznatků o výrobě ozubení

1.4.4.1 Konvenční odvalovací frézky

Konvenční odvalovací frézky mají jeden hlavní motor, který pohání jak vřeteno s nástrojem, tak vřeteno s obrobkem. Otáčky obrobku a nástroje musí být svázány v určitém poměru, proto je pohon z hlavního motoru rozdělen přes diferenciál a mechanické převodovky k vřetenu nástroje a vřetenu obrobku. U prvních konvenčních frézek bylo nutné tyto mechanické převodovky přesně složit, aby odpovídaly otáčky obrobku otáčkám nástroje. K tomu sloužily výměnná ozubená kola, pomocí kterých byl v převodovce zvolen správný převodový poměr. Moderní konvenční frézky mají tyto převodovky poloautomatizované a dá se nastavit velké množství otáčkových poměrů.

U starších konvenčních frézek byl problém s přesností, jelikož každé soukolí v převodovkách motor – nástroj a motor – obrobek měli své vůle. Tyto vůle se sečetly a vznikaly nepřesnosti v nastavení a tím i ve výrobě.

1.4.4.2 CNC odvalovací frézky

Počítačové řízení stroje umožňuje ovládat více součástí najednou. Proto CNC odvalovací frézky mají samostatné elektromotory jednotlivých prvků, které jsou řízeny počítačem. Díky tomu můžeme dosahovat vyšších řezných podmínek, kdy pohon obrobku a nástroje zajišťují jejich samostatné elektromotory s plynulou změnou otáček. Zároveň je možné svázat program CNC stroje s dopravníkovým systémem a tím zajistit plynulou logistiku výroby a snížit časy vykládání a zakládání součástí pracovníkem.^[9]



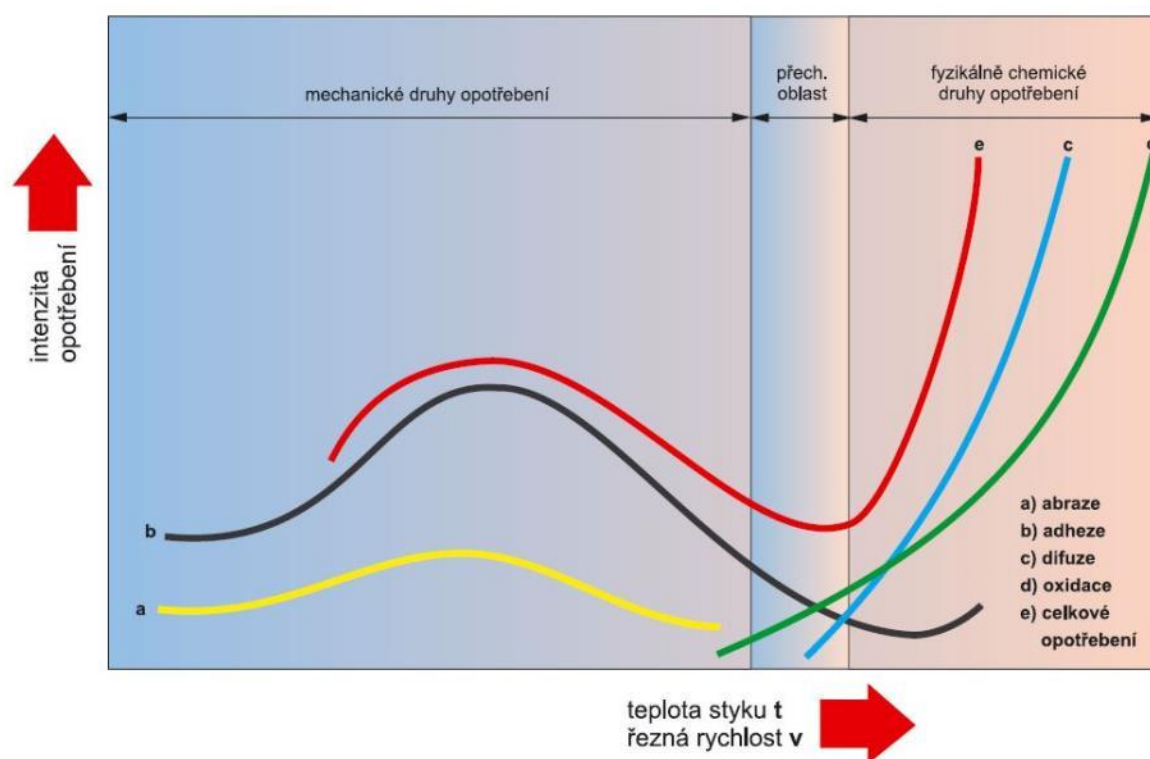
Obr. 13: Odvalovací frézky - konvenční(vlevo) a CNC (vpravo)

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění, délkové charakteristiky otupení bříty obráběcího nástroje, Taylorův vztah.

2.1 Definice pojmů

2.1.1 Opotřebení nástroje a jeho příčiny

Obrábění je složitý proces, při němž dochází k teplotním, silovým i chemickým působení na nástroj. Na hřbet a čelo nástroje působí síly a teplo od vzájemného tření materiálů obrobku a nástroje. Otěrem třísky o čelo nástroje a obrobku o hřbet vznikají kovově čisté plochy, na kterých při vysokých teplotách probíhá difuze atomů. Zároveň obráběný materiál často obsahuje částice, které mají tvrdost stejnou, nebo i vyšší, než má nástroj, dochází tedy k obrusu čela a hřbetu. Pod těmito zatíženími dochází k celkovému opotřebení nástroje.



Obr. 14: Vliv řezné rychlosti na intenzitu opotřebení^[11]

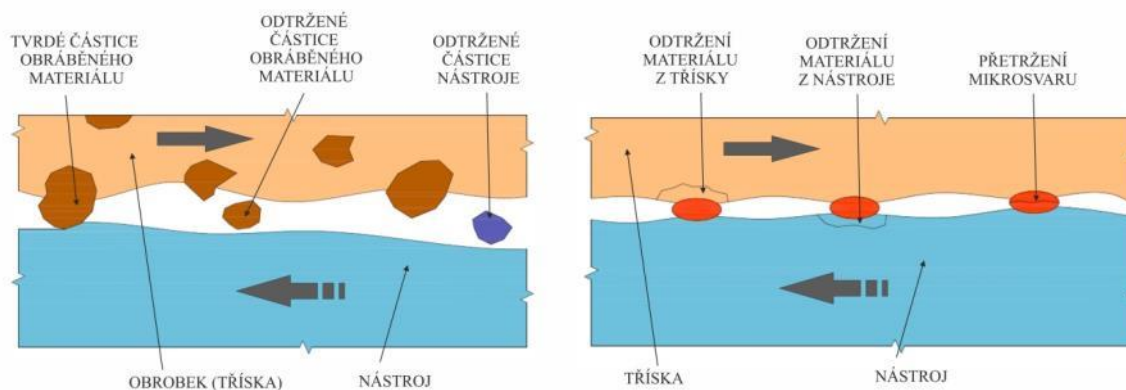
Abraze

Abraze, nebo také brusný otěr, je v podstatě vybrušování měkčích částic nástroje tvrdšími částicemi obráběného materiálu. Brusný otěr je významný především při nízkých rychlostech obrábění, kdy se o sebe otírají mikronerovnosti obrobku a nástroje, při vyšších rychlostech se na spodní straně třísky vytváří tzv. tekoucí vrstva, která neumožňuje větší otěr. Abrazivní opotřebení nástroje je tedy častější u nástrojů z nástrojové a rychlořezné oceli, které se používají při nižších rychlostech obrábění.^[10,11]

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

Adheze

K adheznímu opotřebení nástroje dochází tvorbou mikrosvarů v důsledku vysoké plastické deformace mezi nástrojem a obráběným materiálem, tyto mikrosvary jsou následně odtrženy a s nimi i částice materiálu nástroje. Nejvýznamnější je při nižších rychlostech, kdy je už teplota tření dostatečná pro vytvoření mikrosvaru, ale zároveň nízká rychlost, aby se mohl vytvořit větší mikrosvar. Stejně jako u abrazivního opotřebení se nejčastěji vyskytuje u nástrojových a rychlořezných ocelí.^[16,10]



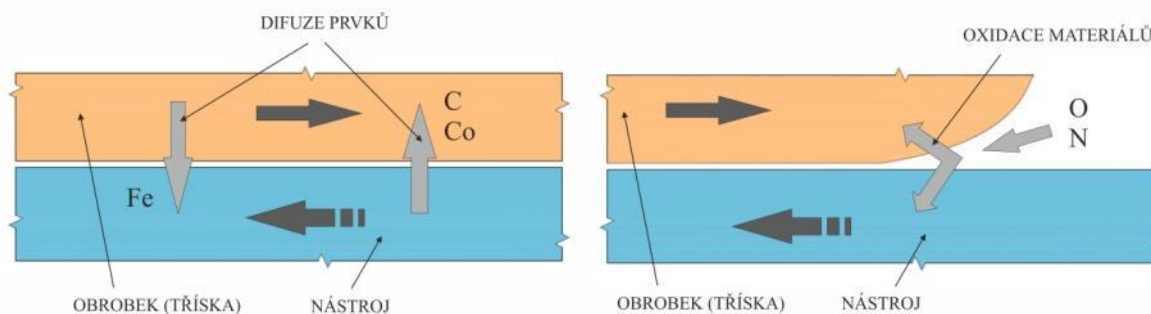
Obr. 15: Princip abraze (vlevo) a adheze (vpravo)

Difuze

Při difuzi dochází k migraci atomů z nástroje do obrobku a třísky a naopak. Atomy pak vytvářejí v nástroji nové sloučeniny a tuhé roztoky a tím mění chemické složení povrchu nástroje, materiál pak ztrácí řezné vlastnosti. K difuzi dochází především při vyšších rychlostech, proto se vyskytuje nejčastěji u slinutých karbidů.^[10,11]

Oxidace

Během obrábění může materiál nástroje reagovat s okolní atmosférou, ale i s řeznou kapalinou, a vytvářet oxidy. Některé oxidy snižují tvrdost a stálost povrchu nástroje a naopak některé oxidy zvyšují jeho tvrdost, ale i křehkost. K oxidaci dochází především na okrajích styku třísky nebo obrobku s materiálem nástroje a vytváří charakteristické opotřebení.^[16,10]



Obr. 16: Princip difuze (vlevo) a oxidace (vpravo)

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

2.1.2 Typy opotřebení nástroje

Působením předešlých jevů se na břitu nástroje vytváří opotřebení, které je patrné při zvětšení pod mikroskopem. Opotřebení se liší použitou operací, materiály a řeznými podmínkami. Při zvýšeném opotřebení dochází k snížení jakosti povrchu obrobku, snížení přesnosti obráběných ploch a zvyšuje se možnost destrukce nástroje. Zhodnocením kritéria typu opotřebení je možné volit vhodnější materiál nástroje a řezné podmínky a tím ovlivňovat trvanlivost a životnost nástroje.

Opotřebení hřbetů nástroje

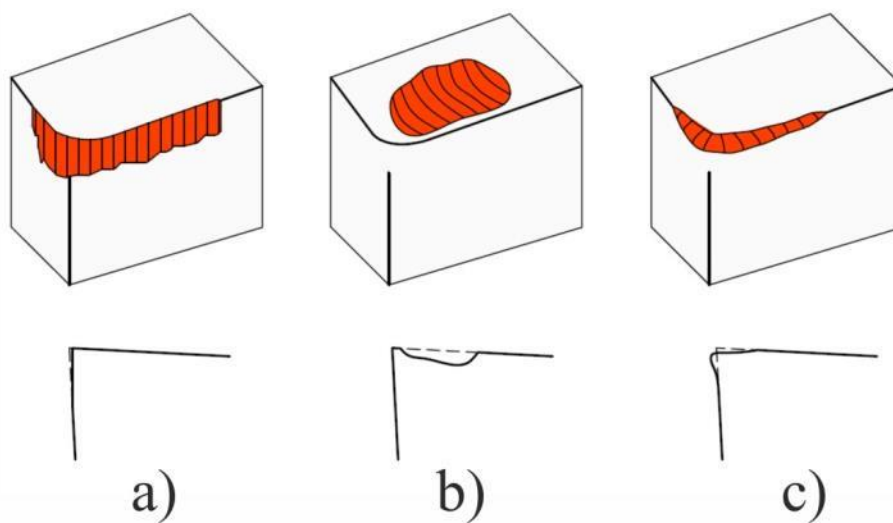
Způsobeno především abrazivním působením obráběného materiálu na hřbet nástroje. To má za následek úbytek materiálu na hlavním a vedlejším hřbetu a snižováním poloměru špičky. Všeobecně je opotřebení hřbetů nejčastější typ. Velikost opotřebení má vliv na drsnost povrchu, přesnost rozměrů obrobku a nárůst tření procesu. Snahou je udržet rovnoměrnou velikost opotřebení. ^[12,16]

Opotřebení ve tvaru žlábků na čele

Žlábek na čele vzniká v důsledku spojenému působení abraze a difuze na povrchu čela nástroje. V tomto bodě vznikají největší tlaky a teploty díky tření třísky o čelo. Žlábek zapříčiňuje změnu směru odchodu třísky a geometrii čela, tím se změní i působící výslednice sil. K jeho odstranění je možné použít materiál nástroje, který je stálejší za vyšších teplot, nebo použít materiál, který nemá vysokou afinitu s obráběným materiálem. ^[12,16]

Plastická deformace břitu

Při působení vysokých teplot a tlaků na břit ztrácí materiál nástroje tvrdost a pevnost v tahu, což má za následek změnu geometrie břitu. Typickou plastickou deformací je vyboulení břitu, což má za následek další zvyšování teploty. Při dosažení kritické hodnoty může dojít k utavení špičky, nebo k jejímu lomu. ^[12,16]



Obr. 17: a) opotřebení hřbetů nástroje, b) opotřebení ve tvaru žlábků na čele, c) plastická deformace břitu

Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetech

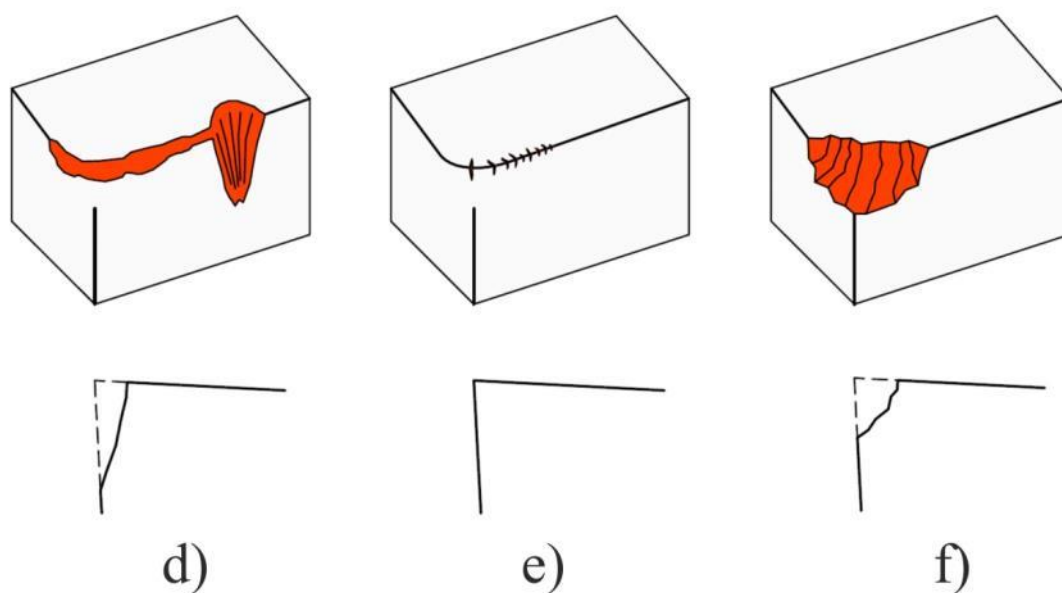
Tento typ opotřebení je zapříčiněn adhezním a oxidačním působením. Vruby vznikají v místech kontaktu třísky s nástrojem a je umožněn přístup vzduchu do řezného procesu. Zároveň je to místo, kde může být obráběna povrchově upravená vrstva materiálu, nebo okujený materiál, který má vysokou tvrdost. ^[12,16]

Hřebenové trhlinky

Hřebenové trhlinky vznikají při tepelných šocích materiálu nástroje. K těmto šokům dochází především u frézování s chladicími kapalinami. Jednotlivé trhlinky oslabují břit a při dosažení kritické hodnoty mohou vyvolat náhlý lom břitu. Snížením tloušťky třísky se sníží i řezné teploty a pokud možno, snažit se frézovat bez použití chladicích kapalin. ^[12,16]

Lom břitu nástroje

K lomu břitu dochází při příliš vysokém mechanickém zatížení nebo krátkodobém přetížení břitu např. přerušovaný řez, vměstek v obráběném materiálu nebo náhlé změně průřezu třísky. Většinou to znamená nevratnou destrukci nástroje. ^[12,16]



Obr. 18: d) opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetech, e) hřebenové trhlinky, f) lom břitu nástroje

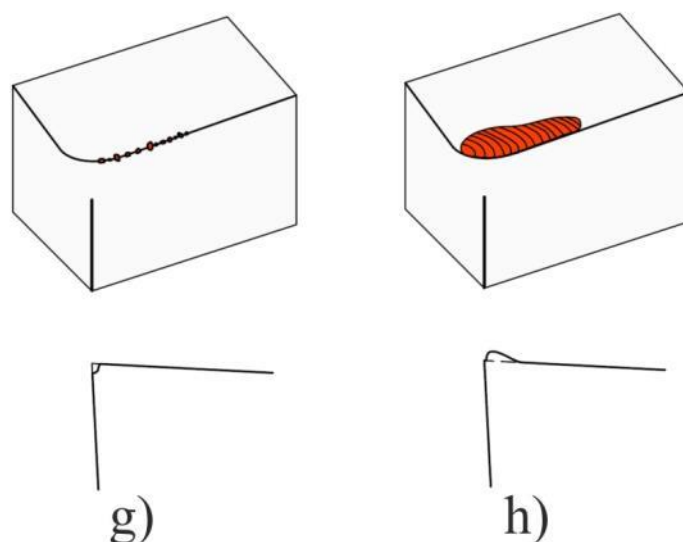
Křehké porušování řezné hrany

K tomuto opotřebení dochází při špičkách zatížení, nízké tuhosti soustavy S-N-O-P, a když obráběný materiál obsahuje velké tvrdé částice. Z ostří se oddělují větší kusy materiálu. Většinou se toto opotřebení vyskytuje v kombinaci s opotřebením hřbetů, proto není patrně viditelné. ^[12]

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

Tvorba nárůstku na čele nástroje

Nárůstek je ulpívající obráběný materiál na čele nástroje. Při nízkých teplotách a vysokých tlacích se tvoří mezi materiálem nástroje a obráběným materiálem mikrosvary, které se navyšují, až vznikne velká vrstva – nárůstek. Nárůstek mění řezné úhly nástroje a má také zásadní vliv na kvalitu povrchu obrobku. Při odtržení nárůstku se často odtrhává i materiál nástroje. K tomuto jevu dochází při malých rychlostech obrábění, proto k jeho odstranění stačí zvýšit rychlost. ^[12,16]



Obr. 19: g) křehké porušování řezné hrany, h) tvorba nárůstku na čele nástroje

2.1.3 Kritéria opotřebení

Opotřebení nástroje se kvalifikuje podle normy ČSN ISO 3685, ve kterých jsou nejrozšířenější parametry VB, KT a VBmax (viz. Obr. 19). Podle těchto parametrů se určuje kdy je nástroj otupený a je zapotřebí jeho výměna. Míry jednotlivých otupení jsou posuzována podle různých hledisek. Jedno z hledisek je technologické, kdy míra otupení má již vliv na přesnost a kvalitu obrobku, další je ekonomické hledisko, to se řídí hospodárností procesu výroby.

Jednotlivé parametry na Obr. 20:

KT – hloubka žlábků na čele

KB – šířka žlábků na čele od řezné hrany

KL – šířka žlábků na čele

KM – vzdálenost středu žlábků od řezné hrany

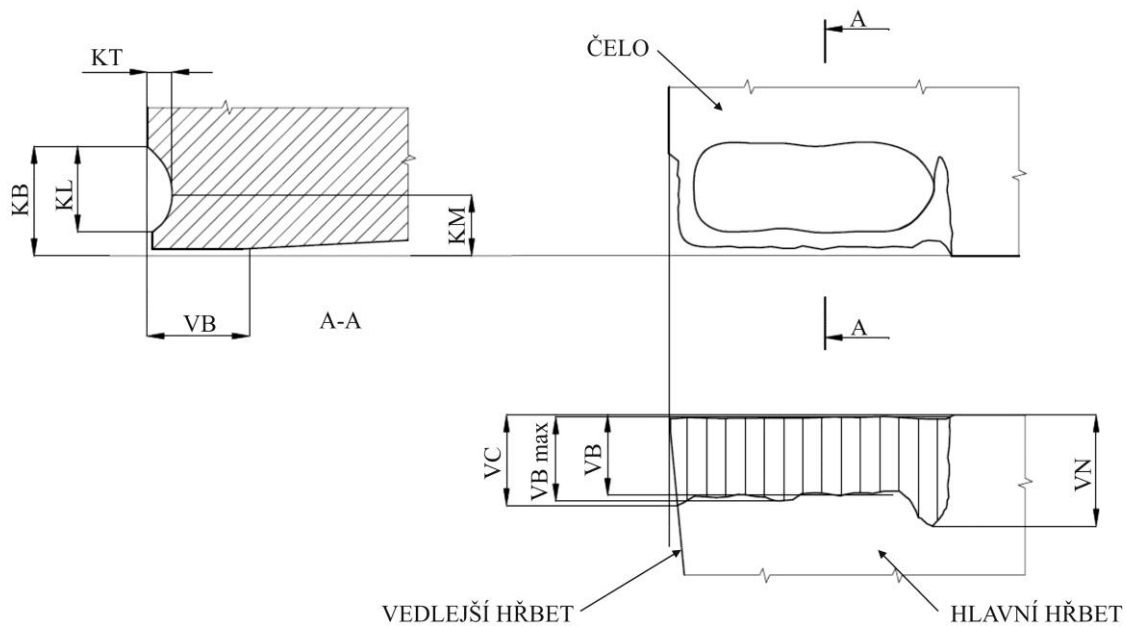
VB – průměrné opotřebení hlavního hřbetu

VBmax – maximální opotřebení hlavního hřbetu

VC – opotřebení hřbetu v oblasti špičky

VN – vrubové opotřebení hlavního hřbetu

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění



Obr. 20: Kritéria opotřebení podle ISO 3685

2.1.4 Metody stanovení opotřebení nástroje

Přímé metody

Při procesu obrábění je těžké jakkoliv pozorovat otupující se břit nástroje, protože je v řezu, proto je nutné u většiny operací přerušit operaci a sejmuti nástroj z držáku a až poté provést měření. ^[16]

1. Mikrometrická metoda (přímé měření opotřebení při zvětšení)
2. Váhová metoda (vážení úbytku váhy nástroje)
3. Radioizotopová metoda (měření radioaktivních částic nástroje v tříске)
4. Optická metoda (měření hloubky žlábků pomocí světelné mřížky)
5. Nanosení odporové vrstvy (měření odporu nanesené vrstvy na nástroji)
6. Pneumatická metoda (kolmá vzdálenost trysky od obrobku – zmenšování vzdálenosti s postupným opotřebováváním hřbetu nástroje)

Nepřímé metody

Proces opotřebení nástroje je doprovázen jevy, které je možné měřit a zaznamenat přímo během obrábění a není potřeba přerušovat proces. Avšak tyto metody jsou pouze přibližné a není možné z nich stanovit přesné opotřebení nástroje. ^[16]

1. Vzrůst řezné síly (pomocí dynamometru odměřovat řezné síly)
2. Zvyšování výkonu a krouticího momentu (spojené se zvyšováním řezné síly)
3. Vznik chvění a doprovodných zvuků (odměřování chvění a akustiky)
4. Zvyšování teploty (termometry odměřující teplotu v místě řezu)
5. Změna barvy třísky (spojeno se zvýšenou teplotou)

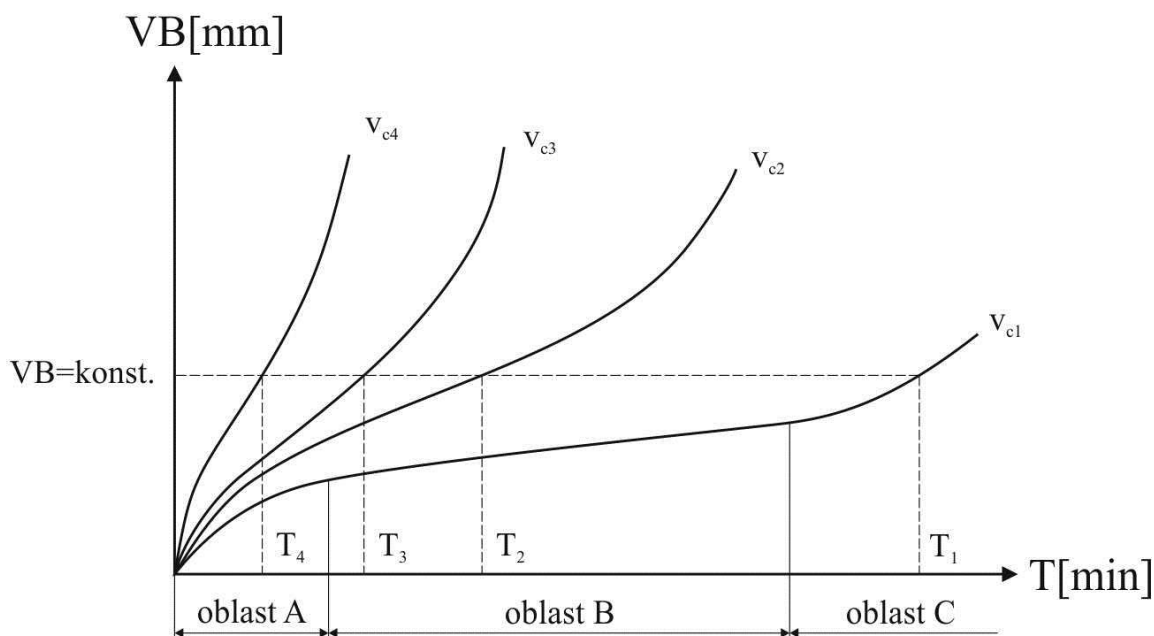
2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

6. Změna rozměrů obrobku (měření vzdálenostními čidly)
7. Zhoršení drsnosti povrchu (zkoumání vysokorychlostními kamerami)
8. Emise signálů v pásmu ultrazvuku (zkoumání šíření akustických emisí v obrobku a tříse)

2.1.5 Opotřebení v čase

Každý druh opotřebení má různý časový průběh. Po změření opotřebení v určitých časových intervalech vyjde křivka opotřebení pro danou operaci, řezné podmínky a materiály. Při změně jakéhokoli parametru se bude měnit i tato křivka.

Nejčastěji se bere ohled na opotřebení hřbetu nástroje VB . V Obr. 21 je znázorněn graf závislosti opotřebení na hřbetě VB na čase T . Výsledkem jsou jednotlivé křivky pro různé řezné rychlosti v_c ($v_{c1} < v_{c2} < v_{c3} < v_{c4}$). Při proložení přímkou $VB = \text{konst.}$ je možné odečíst časy (T_1, T_2, T_3, T_4), kdy při rychlostech dojde ke stejnému opotřebení na hřbetě.



Obr. 21: Závislost opotřebení VB na čase T ^[10]

V oblasti A dochází k vysokému nárůstu opotřebení hřbetu v důsledku velkého tlaku na hlavní ostří. Tento tlak je způsoben hlavní řeznou silou, která působí na malou plochu ostří. S časem se tato plocha opotřebením zvětšuje a snižuje se tlak. Oblast B má skoro lineární průběh, působí zde především abrazivní mechanismy. Postupným nárůstem tepleného ovlivnění materiálu nástroje dochází k lavinovému opotřebení v oblasti C. V této oblasti probíhá rychlý nárůst opotřebení, proto je snaha jí nedosahovat ve velké míře.^[10]

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

2.2 Trvanlivost a životnost nástroje

2.2.1 Trvanlivost

Trvanlivost nástroje je doba, po kterou dokáže nástroj obrábět, než dosáhne zvolených kritérií opotřebení (viz Kritéria opotřebení 2.1.3.). Při dostatečně dlouhé operaci je trvanlivost stanovena časově, tedy kolik minut dokáže nástroj pracovat, nebo pokud jsou operace krátké, tak se volí počet operací do dosažení kritériálního opotřebení. Trvanlivost je stejně jako samotné opotřebení závislé na řezných parametrech, typu obrábění a na materiálu nástroje a obráběného materiálu. ^[10,16]

2.2.2 Taylorův vztah

Na trvanlivost má největší vliv řezná rychlost, na to přišel již začátkem minulého století Frederick Winslow Taylor, a z praktických zkoušek vytvořil závislost trvanlivosti na řezné rychlosti, tedy $T - v_c$ závislost. Z této závislosti se v současné době odvodily, a řídí se jím, normy ČSN ISO 3685, i ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2. Tato závislost je také známa pod pojmem Taylorův vztah: ^[16]

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}] \quad (3)$$

kde C_T [-] je konstanta Taylorova vztahu, v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] je řezná rychlost a m [-] je exponent, který je dán především kvalitou (řezivostí) obráběcího nástroje. Exponent se pohybuje v rozmezích: ^[10]

$m = 10 - 8$ pro nástrojovou ocel,

$m = 8 - 5$ pro rychlořezné oceli,

$m = 5 - 2,5$ pro slinuté karbidy,

$m = 2,5 - 1,5$ pro řeznou keramiku.

Nové technologie výroby a nové materiály snižují tento exponent.

Další tvar Taylorova vztahu byl vytvořen kvůli nepraktické velikosti konstanty C_T , kdy se hodnoty pohybovaly mezi 10^9 a 10^{13} . Vztah pak má podobu: ^[16]

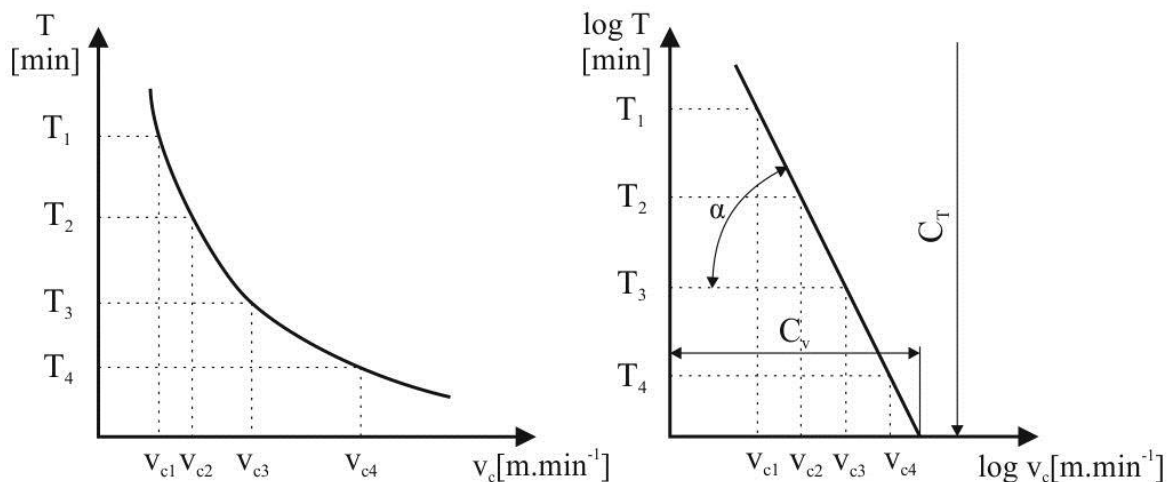
$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (4)$$

kde C_v [-] je konstanta Taylorova vztahu a dosahuje hodnot v rozmezí $10^2 - 10^3$.

Pro zjištění konstant C_v , C_T a m je potřeba zkonstruovat graf závislosti $T - v_c$. Zkonstruování se provede po alespoň 4 zkouškách trvanlivosti za různých řezných rychlostí při konstantních hodnotách a_p , f a způsobu chlazení (u soustružení). Po naměření jsou z grafu opotřebení odečteny trvanlivosti při konstantní hodnotě VB (viz Obr. 21) a jsou naneseny do grafu jako body $v_{c1} - T_1$, $v_{c2} - T_2$, $v_{c3} - T_3$, $v_{c4} - T_4$. (viz Obr. 22 vlevo). Pro získání lineární závislosti je potřeba křivku převést na logaritmické měřítko. (viz Obr. 22 vpravo). V logaritmických souřadnicích je možné odečíst hodnotu C_v , která je rovna hodnotě na grafu

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

při $T = 1$ [min]. Hodnota C_T je analogicky hodnota na grafu při $v_c = 1$ [m.min⁻¹]. Exponent m představuje směrnici přímky grafu v logaritmických souřadnicích, tedy z grafu $m = \lg \alpha$ [-].



Obr. 22: Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti v normálních souřadnicích (vlevo) a logaritmických souřadnicích (vpravo)^[10]

2.2.3 Životnost

Životnost nástroje je dána počtem trvanlivostí od jeho prvního použití do jeho vyřazení. U nástrojů, které se dají ostřit je to teda počet jejich přebroušení, dokud se dají dodržet řezné úhly a roviny daného nástroje, nebo dokud by nehrozilo nebezpečí destrukce nástroje během obrábění (příliš oslabené ostří broušením). U vyměnitelných břitových destiček (VBD) je to potom počet možných otočení destičky v držáku.^[10,16]

Tedy pro nástroje pro přeastření platí:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x + 1) \cdot T, \quad (5)$$

kde T_i [min] jsou jednotlivé trvanlivosti, T [min] je aritmetický průměr všech trvanlivostí T_i a x [-] je počet přeastření nástroje.

U VBD je životnost vypočtena podle vzorce:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T, \quad (6)$$

kde T_i [min] jsou trvanlivosti ostří destičky, T [min] je aritmetický průměr všech trvanlivostí T_i a q je počet možných otočení VBD.

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

2.3 Vlivy na trvanlivost a životnost

2.3.1 Řezné podmínky

Hloubka řezu a_p

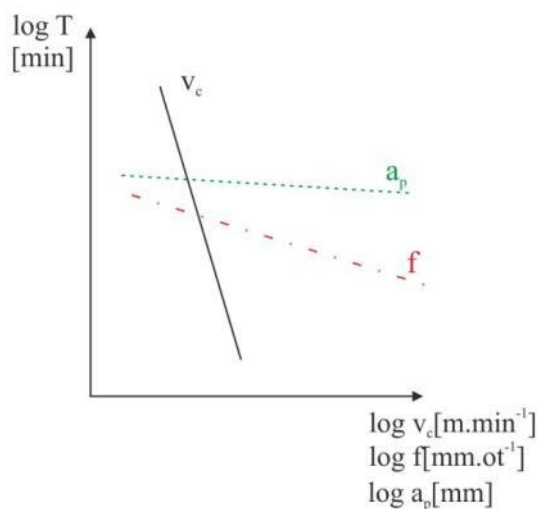
Vliv hloubky řezu je u trvanlivosti a životnosti nástroje zanedbatelná. Avšak při malé hloubce může docházet k vibracím a vzniku velkého tepla a při velké hloubce je zase tvorba velkých sil a tím i namáhání ostří.^[12]

Rychlost posuvu f

Má větší vliv na trvanlivost, než hloubka řezu, ale stále má menší směrnici. Při nízké hodnotě posuvu se tvoří nárůstek na břitu a dochází k rychlejšímu opotřebení břitu, při vysokém posuvu se snižuje kvalita obrobeného povrchu a zvyšuje se opotřebení ve tvaru žlábků na čele.^[12]

Řezná rychlost v_c

Má největší vliv na trvanlivost nástroje. Ve většině případů se ostatní podmínky zanedbávají a počítá se jenom s řeznou rychlostí. Nízká řezná rychlost má za následek nárůstek na břitu a špatnou kvalitu obrobeného povrchu, vysoká rychlost zvyšuje podstatně opotřebení hřbetu, plastickou deformaci nástroje a tvorbu žlábků na čele nástroje.^[12]



Obr. 23: Vliv řezných podmínek na trvanlivost nástroje^[12]

2.3.2 Materiál nástroje a materiál obrobku

Materiál nástroje

Některé materiály se vyznačují vyšší otěruvzdorností a vyšší teplotní stabilitou, proto jsou schopné pracovat za vyšších řezných rychlostí a zároveň dosahovat delší čas trvanlivosti. Další možností je povlakování nástroje, které zvyšuje otěruvzdornost i teplotní stabilitu. (viz 3.1)

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění

Materiál obrobku

Při obrábění různých druhů materiálů vznikají jiné teploty a abrazivní účinky na břit nástroje. K velikosti opotřebení se vztahuje i struktura obráběného materiálu, legury, vměstky a tvrdost materiálu. Práce nástroje při vyšších teplotách a velkém abrazivním účinku bude také velmi ovlivňovat trvanlivost nástroje.

2.4 Zkoušky trvanlivosti

2.4.1 Krátkodobé zkoušky

Metoda A.S.Kondratova

Metoda je založená na intenzitě opotřebení břitu při různých řezných rychlostech. S narůstající rychlostí se zvětšuje i intenzita opotřebení. Princip metody je v měření opotřebení v určitých časových úsecích. Po změření opotřebení po časovém úseku se zvýší i řezná rychlost. Provází se při konstantním a_p a f . Po dosažení maximální rychlosti zkoušky, nebo kritériálního opotřebení VB je zkouška u konce. Intenzita opotřebení se zjistí pomocí vzorce:^[13]

$$I = \frac{\Delta VB}{\Delta T}, \quad (7)$$

kde ΔVB [μm] je přírůstek opotřebení, ΔT [min] je přírůstek času řezání a I [$\mu\text{m}/\text{min}$] je intenzita opotřebení. Vznikne nelineární závislost $I = f(v_c)$. Dále je potřeba do grafu vynést hodnotu I_{ekv} , kterou získáme.^[13]

$$I_{ekv} = \frac{\sum \Delta VB}{\sum \Delta T}, \quad (8)$$

kde $\sum \Delta VB$ [μm] je celkový přírůstek opotřebení na hřbetě od minimální hodnoty opotřebení, $\sum \Delta T$ [min] je celkový čas obrábění. Z grafu pak pomocí hodnoty I_{ekv} odečteme hodnotu v_{ekv} , exponent m zjistíme ze sklonu přímky k ose x , kde $m = \text{tg } \alpha$, a můžeme dosadit do vzorce:^[13]

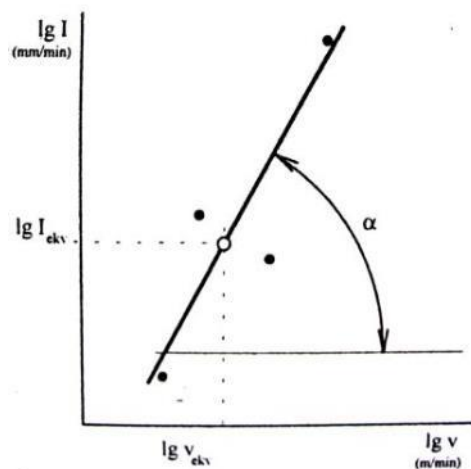
$$v_{ekv} = \frac{C_{vT}}{\sum \Delta T^{\frac{1}{m}}} \rightarrow C_{vT} = v_{ekv} \cdot \left(\sum \Delta T \right)^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

C_{vT} je materiálová konstanta, kterou potřebujeme znát pro závěrečné dosazení do vzorce pro výpočet řezné rychlosti pro určitou trvanlivost (např.: 20 min).^[13]

$$v_{20} = \frac{C_{vT}}{T^{\frac{1}{m}}} \quad (10)$$

U této metody je zapotřebí zvolit alespoň 3 řezné rychlosti, které se nacházejí v přímkové oblasti opotřebení (viz Obr. 21). Většinou se volí podle odborných zkušeností a znalostí o obráběném materiálu a materiálu nástroje.^[13]

2 Trvanlivost nástroje při třískovém obrábění



Obr. 24: Závislost intenzity opotřebení na řezné rychlosti - metoda A.S.Kondratova^[13]

2.4.2 Dlouhodobé zkoušky

Pomocí dlouhodobých zkoušek je snaha se přiblížit reálným procesům při obrábění. Při vybraných řezných podmínkách se měří v časových intervalech opotřebení břitu, ze kterých vychází křivka opotřebení. Největší vliv na trvanlivost má řezná rychlost, proto se dlouhodobé zkoušky provádí především pro zjištění závislosti $T - v_c$, závislosti $T - a_p$ a $T - f$ se provádějí výjimečně, protože nemají takový vliv na trvanlivost (viz 2.3.1).^[14]

Zkouška se provádí na stejném materiálu, za konstantních hodnot a_p a f . Před zkouškou se stanoví časové intervaly pro měření. Po najetí nástroje do plného záběru se spustí stopky a po uběhnutí zvoleného časového intervalu se obrábění přeruší a měří se opotřebení. Pro měření opotřebení se používá mikroskop s nitkovým křížem, nebo Brinellova lupa. Měření probíhá tak dlouho, dokud opotřebení nepřesáhne VB_K , tedy předem zvolenou kritériální hodnotu opotřebení.^[14]

Po naměření všech rychlostí se nakreslí grafy $VB = f(t)$ a odečtou se hodnoty trvanlivosti T z průsečíků křivek s kritériální hodnotou opotřebení VB_K . Z těchto hodnot se dá sestavit závislost trvanlivosti na řezné rychlosti $T = f(v_c)$. Zlogaritmováním grafu je možné odečíst hodnoty m , C_T a C_v a dosadit je do Taylorova vztahu (viz 2.2.2).^[14]

Stejným způsobem se měří i závislosti $T - a_p$ a $T - f$, pouze s tou změnou, že řezná rychlost je konstantní a mění se pouze hodnoty a_p nebo f .

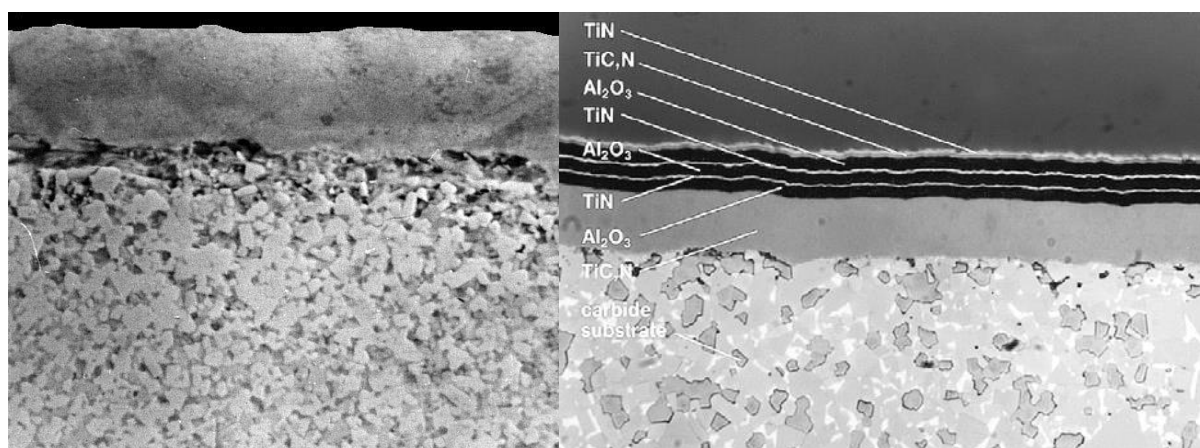
3 Shrnutí poznatků o povlakování nástrojů, typech povlaků a jejich vliv na trvanlivost nástrojů.

3.1 Povlaky obecně

Pro zvyšování ekonomiky výroby bylo zapotřebí zvyšovat i řezné podmínky ve strojních procesech. Původní materiály nebyly schopné při jejich vlastnostech dodržet dostatečnou trvanlivost při zvolených řezných podmínkách, proto se v 60. letech začaly používat tvrdé povlaky. ^[15]

První generace povlaků zajistily dostatečnou tvrdost a otěruvzdornost a základní materiál nástroje zajišťoval houževnatost. Jednalo se o jednovrstvý povlak, především TiC, který byl nanesen v tenké vrstvě. Díky přechodové vrstvě však neměl dostatečnou adhezi k základnímu materiálu a odlupoval se. ^[15]

V dalších generacích povlaků se začaly vytvářet vícevrstvé povlaky, kdy spodní vrstvy povlaků měly lepší adhezi k základnímu materiálu a další povlaky měly sice horší adhezi, ale zajišťovaly větší otěruvzdornost a tvrdost. ^[15]



Obr. 25: Povlak 2.generace (vlevo) a 3.generace (vpravo) ^[16]

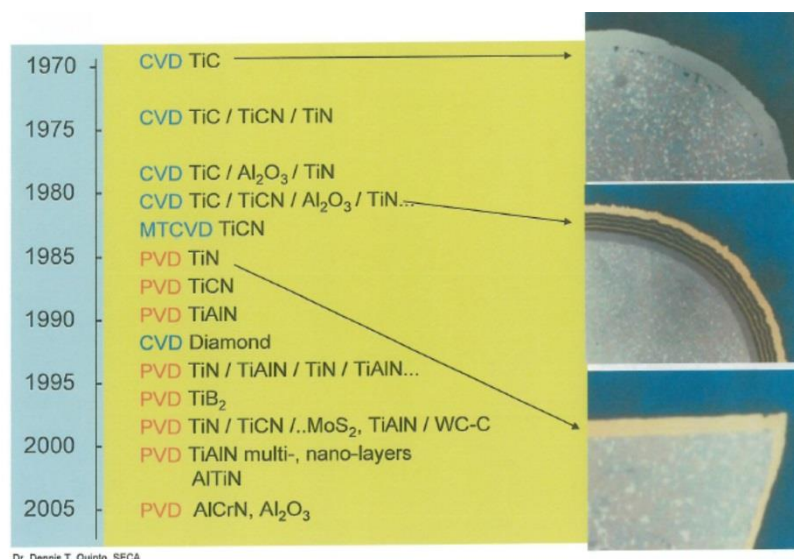
Poslední generace povlaků se skládá z více než deseti vrstev a jsou kombinací předchozích generací. U nejnovějších povlaků je kladena největší pozornost na tvrdost a otěruvzdornost vnějšího povlaku, kdy jsou používány povlaky DLC (Diamond Like Carbon), tedy uhlíkový povlak, který svými vlastnostmi napodobuje diamant. Zároveň jsou zkoumány mezivrstvy, které zabezpečí co nejvyšší adhezi a houževnatost. ^[17]

Tenká vrstva povlaku dokáže zvýšit trvanlivost nástroje o 50%, ale zvyšuje také kvalitu obrobené plochy díky lepšímu koeficientu tření nástroje. Drsnost obráběné plochy může být snížena i o 60%. ^[18]

Zpočátku se povlakovaly především nástroje z rychlořezné oceli, ale s příchodem slinutých karbidů se začaly vytvářet nové technologie a typy povlaků. V současné době

3 Shrnutí poznatků o povlakování nástrojů

existuje velká škála typů povlaků, které jsou vhodné pro určité technologie a obráběné materiály.



Obr. 26: Vývoj povlaků^[27]

3.2 Metody povlakování

3.2.1 Úpravy před nanášením povlaků

Pro nanesení celistvé vrstvy povlaku a jeho dokonalé adhezi je zapotřebí, aby základní materiál byl dokonale hladký. Na ostrých nerovnostech dochází k odlupování a narušování naneseného povlaku.

Pokud je nástroj nový a povlak na něm ještě nebyl použit je potřeba povrch nástroje dokonale odmastit, aby se odstranily mastné a konzervační látky. Následuje mokré čištění, kdy kombinací oplachů, ultrazvuku, elektrochemických metod a těkavých látek jsou z povrchu a nerovností v něm odstraněny zbytkové nečistoty a mastnota. Pro úpravu nástrojů, které nejsou vhodné pro úpravy ve vakuu je zařazena úprava pískováním, popřípadě mikropískováním. Tato technologie se používá, pokud je nástroj erodovaný, nebo zoxidovaný. Abrazivo odstraní nečistoty, které jsou na povrchu a ve větších pórech.^[19]

U nástrojů z HSS je po přebroušení potřeba znovu nanést vrstvu povlaku. Na nepřebroušených plochách nástroje by se však začaly tvořit silné vrstvy na sebe nanesených povlaků, to může způsobovat pnutí a následné narušení povlaku. Pro odpovlakování se používá chemický a elektrochemický děj, kde se u HSS ocelí používá roztok peroxidu vodíku, který při teplotě okolo 70°C reaguje se starým povlakem. Po odstranění povlaku následuje dokonalý oplach, nebo mokré čištění.^[19]

3.2.2 Metoda PVD

PVD, neboli Physical Vapour Deposition, je metoda fyzikálního napařování povlakového materiálu na materiál nástroje. Metoda je především charakterizována nízkými teplotami procesu (150°-500°C) a prací ve vakuu. Díky tomu není tepelně ovlivněn materiál

3 Shrnutí poznatků o povlakování nástrojů

nástroje u HSS. Povlakovací materiál je nejprve převeden do plynné fáze jednou ze 3 metod: [20,16]

- Napařováním,
- Naprašováním,
- Iontovou implantací.

Při napařování dochází k odpařování čistého kovu ze základního materiálu, tzv. terče. Atomy jsou z materiálu odpařovány pomocí elektronového paprsku, obloukového výboje, nebo laseru. Odpařené atomy jsou následně přitahovány k nástroji, který má opačný náboj. [20,16]

U naprašování je terč připojen jako katoda a je bombardována ionty, které jsou urychleny v magnetickém poli. Urychlené ionty pak vytrhávají z terče molekuly a ty se pak usazují na povlakovaném nástroji. Jako zdroj se používá většinou doutnavý výboj, dalšími možnostmi jsou použití iontového paprsku, vysokofrekvenčního signálu nebo magnetronu. [20,16]

Iontová implantace je kombinací předešlých metod. Mezi materiálem nástroje a terčem je vytvořeno elektrické pole, ve kterém na sebe působí částice plynu a čistého odpařeného kovu a ty se následně usadí na povrchu nástroje. [20,16]

Největší výhodou PVD metody je malé tepelné ovlivnění povlakovaného materiálu, proto je možné povlakovat především nástroje z HSS, ale také je možné povlakování plastů. Je možné také napovlakovat ostré hrany. Zároveň je i ekologicky nejšetrnější, protože nejsou použity žádné ekologicky závadné prvky a uvolňují se pouze atomy a molekuly čistých kovů. Nevýhodou je však nutný vakuový systém, který je potřeba pro každý další proces připravit. Povlakovaným materiálem je také potřeba pohybovat, protože plynná fáze povlakového materiálu není homogenně rozložena v reaktoru. [16]

3.2.3 Metoda CVD

U CVD (Chemical Vapour Deposition) metody se povlak vytváří z chemické reakce plynu nad povrchem povlakovaného materiálu. Pro tuto metodu je nutná vysoká teplota plynů 900 – 1200°C. Reagovat můžou buď dva plyny mezi sebou, nebo je možné upravovat jeden plyn pomocí silného elektrického pole. Díky vysoké teplotě se CVD používá především u povlakování slinutých karbidů. [16]

Při nanášení vrstvy TiC dochází k reakci vypařeného chloridu titaničitého s metanem. Vrstva TiN je vytvářena reakcí chloridu titaničitého a reakčním plynem dusíkem. Při kombinaci těchto způsobů se dá nanášet vrstva TiCN. Při nanášení povlaku TiC dochází k oduhličování povrchové vrstvy u ocelí a tím se snižuje její houževnatost, proto je často nejprve nanesena vrstva TiN a později na ni je nanesena vrstva TiC. TiN má však menší přilnavost, než TiC. [16]

Pro tvorbu DLC povlaků je vháněn do reaktoru metan CH₄, který je v silném elektrickém poli rozložen na atomy uhlíku a molekuly vodíku. Uhlík se nanáší na povlakovaný materiál a vodík je odsáván z reaktoru. [20]

3 Shrnutí poznatků o povlakování nástrojů

Metoda CVD umožňuje vytvářet silné i složité vrstvy povlaků velkou rychlostí. Díky vysoké teplotě nanášení má povlak vyšší homogenitu a stabilitu. Tvarově složité povrchy mají heterogenní tloušťku po celém povrchu. Nevýhodou je právě používání vysokých teplot u této metody, kdy dochází k tepelnému ovlivnění materiálů a pro ohřev a odpaření plynů je zapotřebí velké energie. Při nanášení se ostré hrany povlakem zaoblují, protože vrstva je tlustá. Pro tvorbu povrchů jsou používány toxické plyny.^[16]

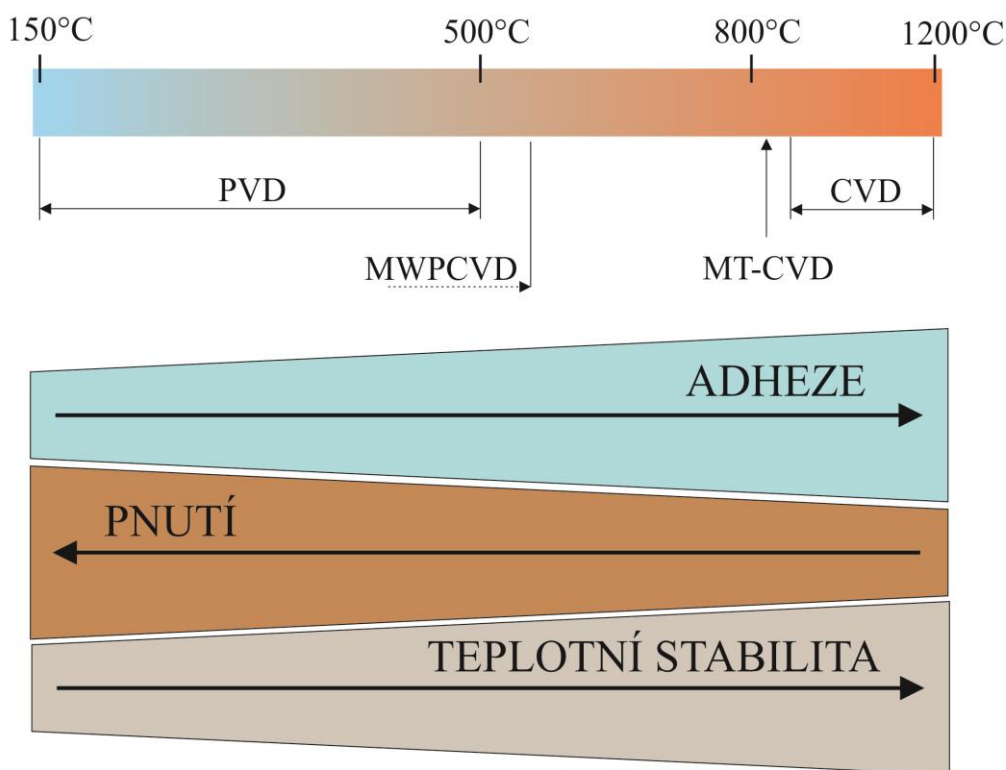
3.2.4 Další metody

Vývoj nových metod se odehrával především u metody CVD, kdy byla snaha snížit teplotu procesu, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění povlakovaného materiálu, a možnost pracovat při atmosférickém tlaku.

Metodou MT-CVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition) bylo možné snížit teplotu procesu na 850°C, kdy dochází ke vzniku vysokotavitelných vrstev TiC a TiN chemickou reakcí karbonitridu titanu a acetonitrilu CH_3CN .^[21]

PECVD (Plasma Enhanced CVD) se zakládá na ionizaci a aktivaci plynů v plazmatickém výboji, vrstva na materiálu pak vzniká za nižší teploty.^[22]

Metoda MWPCVD (MicroWave Plasma CVD) je založena na vytvoření plazmatického výboje pomocí mikrovln. U této metody se dosahuje nejnižších teplot u CVD metod a to 600°C, některé výzkumy ukazují, že se dá dosáhnout i nižších teplot.^[12]



Obr. 27: Teplotní vlastnosti jednotlivých metod povlakování

4 Definice pojmu drsnost povrchu, metody měření drsnosti povrchu

4.1 Definice pojmů

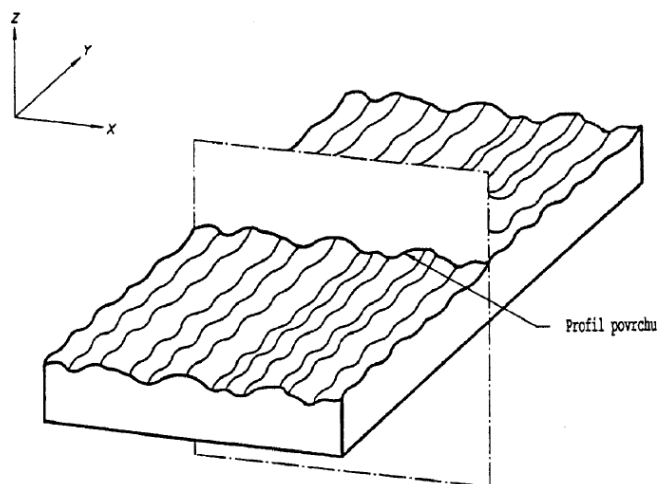
Při jakékoliv technologii obrábění i výrobě vznikají na povrchu nerovnosti většinou mikroskopického měřítka, žádný povrch není dokonale hladký. Tyto nerovnosti se nazývají drsnost povrchu. Drsnost povrchu je jednou z částí tzv. integrity povrchu. Integrita povrchu je soubor vlastností povrchové vrstvy, která byla změněna určitým technologickým procesem. Tento proces změnil vlastnosti vzhledem k základnímu materiálu.^[10]

Drsnost povrchu je při obrábění vytvořena působením nástroje. Typ a stupeň drsnosti je závislý na technologii, mechanických a fyzických vlastnostech obráběného materiálu a velký vliv má geometrie nástroje společně s řeznými podmínkami. Drsnost je také ovlivněna celkovou tuhostí soustavy S-N-O-P a řezném prostředí.

Každá technologie má charakteristický tvar a směr drsnosti. Hodnota drsnosti se liší v podélném a příčném směru, podélný směr je rovnoběžný s řezným pohybem a příčný je na něj kolmý. Při měření drsnosti je nutné zjistit největší hodnotu drsnosti, je tedy nutné ji měřit v příčném směru k obrábění, kde je tato hodnota nejvyšší.

4.2 Parametry drsnosti

Struktura povrchu, tedy i jeho drsnost se řídí podle normy ČSN EN ISO 4287. Podle normy se struktura povrchu dělí podle vlnové délky nerovností. Nejmenší vlnovou délku má drsnost povrchu (R), vyšší vlnovou délku má tzv. vlnitost povrchu (W) a nejvyšší vlnovou délku mají makroskopické nerovnosti povrchu (P). Pro rozdělení vlnitosti na tyto 3 skupiny se používají tzv. filtry vlnitosti, které jsou použité při měření drsnosti.^[23]



Obr. 28: Vytvoření profilu povrchu^[23]

Profil povrchu, nebo také profil drsnosti, vzniká při pomyslném průchodu roviny kolmo k čarám nejvyšší drsnosti (viz Obr. 28). Při pohledu do roviny je vidět mikroskopická drsnost na profilu povrchu.

4 Definice pojmu drsnost povrchu

Střední čára profilu drsnosti odpovídá dlouhovlnné složce profilu, tedy makroskopických nerovností, která se určuje pomocí metody nejmenších čtverců. Střední čára je shodná s osou x v profilu drsnosti.

Pro zhodnocení jednotlivých prvků drsnosti je potřeba zjistit základní parametry (viz Obr. 29):

Vyhodnocovaná délka l_r

Délka zkoumaného profilu ve směru osy x , na které se zhodnocuje drsnost povrchu.

Největší výška výstupku R_p

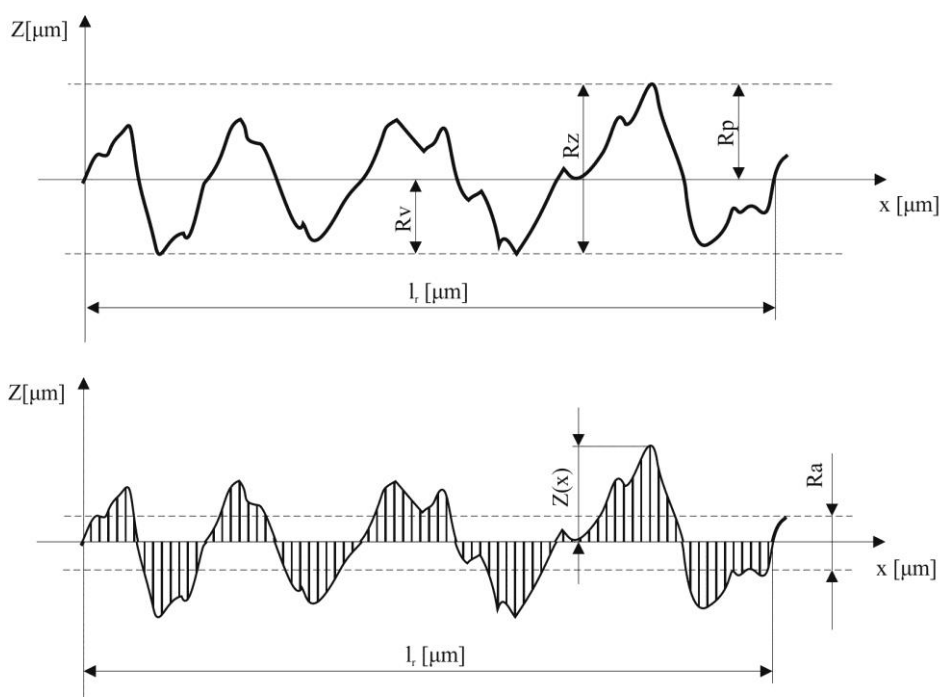
Hodnota nejvyššího výstupku ve vyhodnocovací délce l_r od střední čáry x .

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

Hodnota nejhlubší prohlubně ve vyhodnocovací délce l_r od střední čáry x .

Největší výška profilu R_z

Součet hodnot R_p a R_v .



Obr. 29: Parametry drsnosti

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a

Aritmetický průměr absolutních hodnot $Z(x)$ ve vyhodnocované délce l_r . Tento rozměr nevypovídá přesně o drsnosti povrchu, protože extrémní výšky některých výstupků v ní nejsou znatelné.

4 Definice pojmu drsnost povrchu

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (11)$$

Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq

Průměrná kvadratická hodnota odchylek profilu $Z(x)$ ve vyhodnocené délce l_r . Parametr Rq odpovídá i standardní odchylce z profilových souřadnic, proto je vhodný pro statické pozorování povrchu.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x)^2 dx} \quad (12)$$

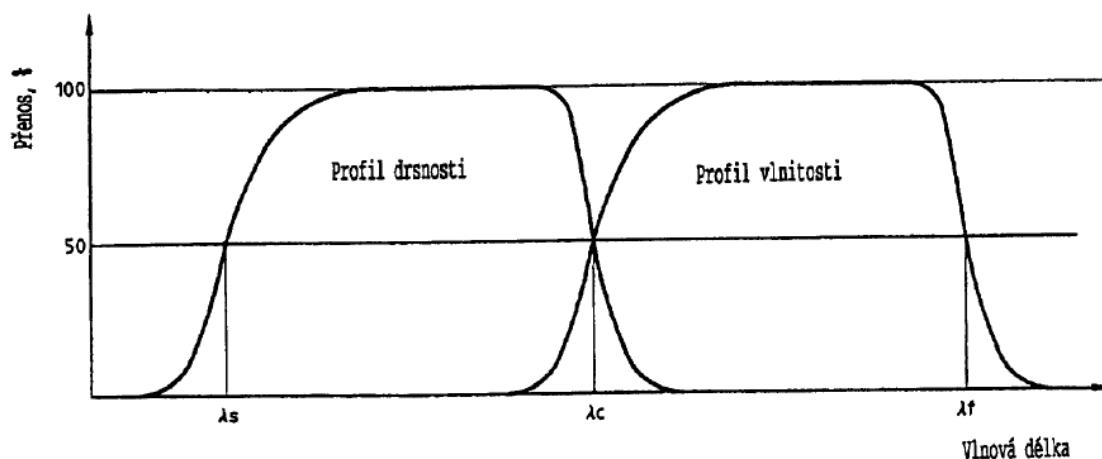
4.3 Filtrace povrchu

Jak bylo naznačeno v kap. 4.2, povrch se skládá ze 3 skupin podle vlnové délky nerovností. Tedy během filtrace je odstraněna nežádoucí složka, u měření drsnosti se měří pouze krátkovlnná složka. Pro odstranění se používají filtry^[23]:

λ_s filtr profilu – určuje rozhraní mezi drsností a nerovnostmi nižší vlnové délky na povrchu

λ_c filtr profilu – určuje rozhraní mezi drsností a vlnitostí povrchu

λ_f filtr profilu – určuje rozhraní mezi vlnitostí povrchu a makronerovnostmi povrchu



Obr. 30: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti^[23]

Samotnými filtry povrchu se zabývá norma ČSN EN ISO 11562. V měřicích přístrojích se používají elektrické frekvenční filtry, které stanovují zároveň i hodnotu střední čáry profilu.

4.4 Měření drsnosti

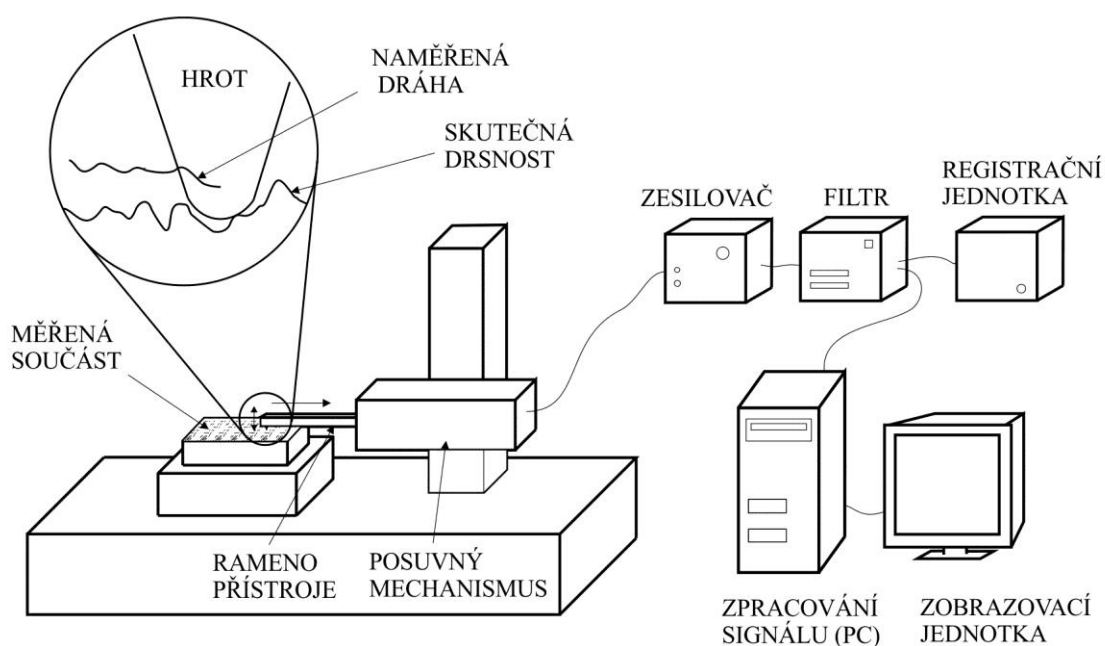
Pro měření drsnosti se používají dvě základní možnosti: kontaktní a bezkontaktní.

4 Definice pojmu drsnost povrchu

4.4.1 Kontaktní měření drsnosti

Toto měření se provádí nejčastěji dotykovými profilometry, které popisuje norma ČSN EN ISO 3274. Jedná se o vysoce citlivé přístroje, které jsou schopny graficky i digitálně zaznamenat profil drsnosti povrchu. Snímání povrchu je prováděno diamantovým hrotem, který je posouván po povrchu součásti ve směru největší drsnosti. Pohyb hrotu na rameni je zaznamenáván pomocí indukční cívky na druhém konci ramene a následně zpracován přístrojem nebo počítačovým softwarem na data drsnosti.

Na přesnost měření má velký vliv poloměr zaoblení špičky ($2 - 10 \mu\text{m}$) hrotu a jeho vrcholový úhel ($60^\circ, 90^\circ$), přitlačná síla při měření ($0,00075\text{N}$) a celková geometrie při měření (rameno – přístroj).^[24]



Obr. 31: Princip měření dotykovým profilometrem

4.4.2 Bezkontaktní měření drsnosti

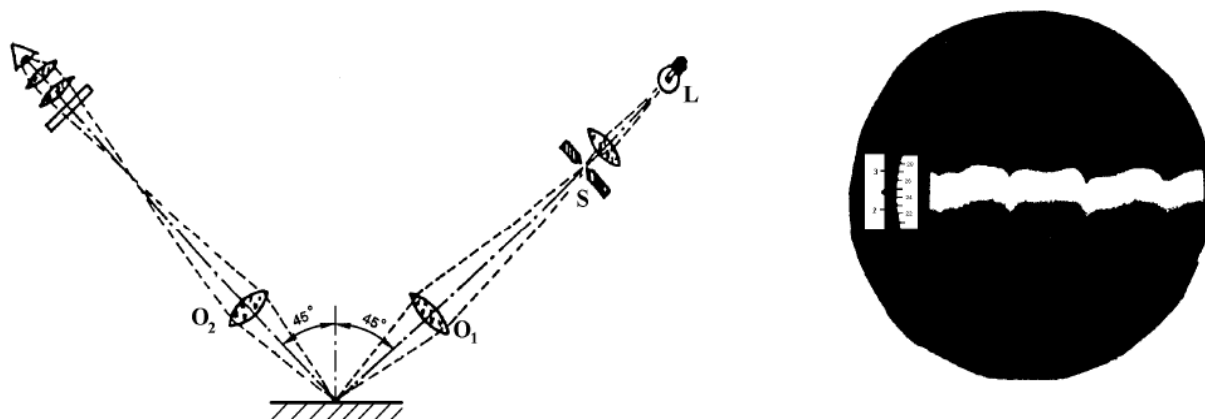
Porovnání drsnosti povrchu s etalony drsnosti

Metoda založená na porovnávání povrchu s etalonem přímo okem, nebo speciálním mikroskopem. Touto metodou dosahujeme pouze orientačních hodnot. Pro porovnávání je zapotřebí stejný (nebo alespoň barevně podobný) materiál etalonu a zkoumaného materiálu, stejný tvar etalonu a součásti (plochý, kulový), stejné pozorovací světelné podmínky. Velkou roli hraje také zkušenost metrologa.

4 Definice pojmu drsnost povrchu

Měření metodou světelného řezu

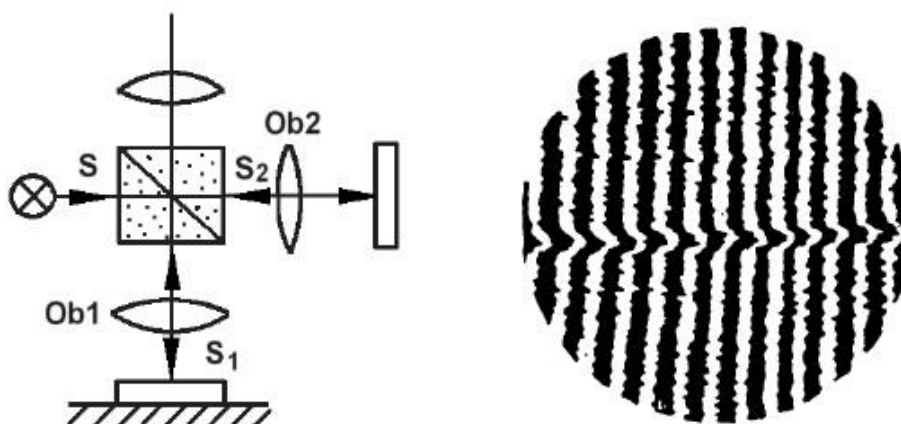
K této metodě se používá nejčastěji dvojitý mikroskop. Měření drsnosti povrchu pomocí rovnoběžného svazku paprsků světla vytvořeného průchodem světla štěrbinovou dírou v jednom mikroskopu a jeho dopadu na povrch součásti pod úhlem 45° . Druhým mikroskopem pozorování dopadové plochy také pod 45° (tedy 90° mezi mikroskopy). Drsnost povrchu má tvar světlezelené stužky ve tmavém poli mikroskopického obrazu.^[24]



Obr. 32: Metoda světelného řezu^[24]

Měření s využitím interference světla

Metoda založená na interferenci dvou světelných paprsků v interferenčním mikroskopu. Svazek světla vytvořený světelným zdrojem S se ve světelném hranolu rozloží pomocí polopropustného zrcadla na dva světelné paprsky. Paprsek S₁ je odražen od měřeného povrchu a paprsek S₂ se odráží od zrcadla zpět do hranolu. V hranolu paprsky interferují a pokračují do okuláru objektivu. Při dokonale rovném povrchu by byl v okuláru vidět svazek rovnoběžných paprsků. Jakákoliv nerovnost vychyluje paprsek a zobrazí se jako narušení rovnoběžnosti paprsků.



Obr. 33: Měření drsnosti s využitím interference světla^[24]

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti boku zubu při odvalovacím frézování vybrané součásti v dílnách firmy WIKOV MGI, a. s.

Předměty výzkumu

Po prvotních konzultacích a zhodnocení časové náročnosti experimentu bylo nutné zvolit vhodnou operaci, která má největší dávku a četnost výroby. Proto bylo zvoleno obrábění ozubeného kola pro železniční průmysl, kde byla dávka 17 ks a četnost výroby byla čtyřikrát do měsíce. Ve většině případů se vyráběly 2 dávky ihned po sobě.

5.1.1 Obrobek – ozubené kolo

Jedná o malosériově vyráběný díl pro lokomotivy v USA. Zároveň má obrobek i speciální konstrukci, kterou nazývají „dělené kolo“. Kolo je rozděleno na dvě symetrické části v příčné rovině. Tato konstrukce ulehčuje jeho výměnu a instalaci v motoru lokomotivy. Věnc kolo je nejprve rozříznut na dvě části, poté spojen pomocí stahovacích pásů a následně osoustružen na rozměry pro výrobu ozubení a drážkování. Vliv dělení kola v této diplomové práci zanedbávám. Po obrobení ozubení a drážkování jsou plochy nitridovány.



Obr. 34: Dělené ozubené kolo

Kolo je vyrobeno z oceli 15330 (31CrMoV9), která je vhodná pro nitridování a je požadována velká tvrdost povrchu za dobré houževnatosti. Tento typ oceli je vhodný pro výrobu zalomených hřídelí, vačkových hřídelí, čepů, vodítek a především je vhodná pro výrobu nitridovaných ozubených kol. Složení oceli je uvedeno v Tabulka 2.

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
Obsah [%]	0,24-0,34	0,40-0,8	0,17-0,37	2,30-2,7	0,2-0,3	0,15-0,3	Max 0,035	Max 0,035

Tabulka 2: Složení oceli ozubeného kola

Měření trvanlivosti nástroje se provádělo na obrábění ozubení na největším průměru kola. Základní parametry ozubeného kola jsou uvedeny v Tabulka 3.

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

Parametr	Rozměr	Údaje
Počet zubů	52	ZÁKLADNÍ ÚDAJE
Modul	5,08 mm	
Roztečný průměr	264,16 mm	
Úhel záběru	20°	REFERENČNÍ ÚDAJE
Rozteč	15,958 mm	
Hlavový průměr	276,225 ^{+0,000} _{-0,505} mm	
Výška hlavy zubu	6,032 mm	
Celková výška zubu	12,446 mm	
Základní kružnice	248,229 mm	
Tvořící kružnice	256,715 mm	VÝROBNÍ ÚDAJE
Patní průměr	249,992 mm	
Základní rozteč	14,996 mm	
Druh tvaru zubu	EVOLVENTA	
Drsnost boku zubu Ra	1,6	
Drsnost v patě zubu Ra	6,3	
Drsnost kde není specifikováno jinak Ra	6,3	

Tabulka 3: Základní rozměry ozubeného kola

Protože se ozubené kolo navrhovalo a původně i vyrábělo v USA je modul 5,08 mm převodem z palcového systému, kde modul byl 0,2 in, tedy 0,2 palce.

5.1.2 Nástroj – odvalovací fréza

Při experimentu byly používány 3 identické frézy od výrobce nástrojů Fette tools. Nástroje byly vyrobeny práškovou metalurgií z materiálu PM4 (REX M4), jehož složení je možné vidět v Tabulka 4. Práškovou metalurgií je možné do materiálu dostat více legujících prvků, než ve srovnání s tavenými rychlořeznými oceli. Díky tomu má RO-PM jemnější zrnitost materiálu, vyšší čistotu a rovnoměrnější rozmístění karbidů. ^[9]

Všechny tři nástroje byly již dříve používány, tedy přebroušeny a přepovlakovány. Zbývající životnost všech nástrojů byla přibližně stejná.

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

	C [%]	Cr [%]	W [%]	Mo [%]	V [%]	Co [%]	HRC
REX M4	1,3	4,3	5,9	4,9	4,1	-	64

Tabulka 4: Složení materiálu nástroje

Parametr	Rozměr
Modul	5,08 mm
Vnější průměr	107mm
Pracovní délka	160
Počet chodů	1
Počet hřebenů	15

Tabulka 5: Parametry nástroje

5.1.3 Stroj – odvalovací frézka TOS OFA 32 CNC 6

TOS OFA 32 CNC 6 je číslicově řízená frézka od výrobce TOS Čelákovice. Instalace frézky byla provedena v únoru 2001, jedná se tedy o poměrně nový stroj.



Obr. 35: Odvalovací frézka TOS OFA 32 CNC 6

Parametr	Rozměr
Max. průměr obráběného kola	320 mm
Max. možný obráběný modul	7 mm
Max. průměr nástroje	160 mm

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

Max. délka nástroje	220 mm
Rozsah otáček nástroje	70 – 900 min ⁻¹ – plynulá změna
Rozsah otáček obrobku	1 – 225 min ⁻¹ – plynulá změna

Tabulka 6: Parametry stroje

5.2 Povlaky nástroje

Hlavním předmětem experimentu bude vliv trvanlivosti na druhu povlaku odvalovací frézy. Pro experimenty byly vybrány 3 povlaky od firmy CzechCoating, s.r.o., která již dlouhou dobu zajišťuje povlakování většího množství nástrojů pro firmu Wikov MGI a.s. Výběr povlaků byl prováněn za přítomnosti technického zástupce firmy CzechCoating pana Johna, který zvažoval aspekty jednotlivých povlaků. Nakonec byly zvoleny tyto tři povlaky:

TiAlN, TiSiN, AlCrN. Všechny tři povlaky jsou nanášeny metodou PVD ve stejné tloušťce při teplotě pod 500°C.

Vrstva	Struktura	Barva	Tloušťka [μm]	Mikrotvrdość (0,05HV)/1	Koeficient tření pro oceli	Max. teplota použití [°C]
TiAlN	monovrstva	Fialovo-šedá	1 - 4	3000	0,4	800
TiSiN	monovrstva	Okrová	1 - 3	4000	0,4	900
AlCrN	monovrstva	Šedočerná	1 - 5	3300	0,4	1100

Tabulka 7: Vlastnosti vybraných povlaků

Povlak TiAlN je nástupce prvního povlaku TiN, kdy zajišťuje vyšší otěruvzdornost a tepelnou stabilitu. Jeho použití je časté především u řezných nástrojů pro vysoké řezné rychlosti a vysoké tepelné zatížení. Snáší dobře pracování s řeznou kapalinou, ale i bez ní.

TiSiN patří mezi nové technologie povlakování. Jeho přednosti jsou především vysoká mikrotvrdość a velká tepelná stabilita (někteří výrobci povlaků zaručují i pracovní teploty okolo 1500°C). Vhodný je pro obrábění tvrdých slitin bez použití řezné kapaliny, ale také pro vysokorychlostní obrábění.

Povlak AlCrN je v současnosti jeden z nejlepších povlaků pro obrábění bez řezné kapaliny, který neobsahuje titan. AlCrN má vysokou odolnost proti oxidaci a odolnost za tepla. Jeho uplatnění je především ve vysoce výkonném odvalovacím frézování.

Protože se experiment prováděl při operaci hrubování byly povlaky nanášeny v největších tloušťkách, které povlak dovolil. Tato úprava zajistí, že se nebude tvořit tak velký žlábek na čele, který by měl jinak také velký vliv na trvanlivost nástroje z PM-RO a to díky

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

snížení přenosu tepla do čela nástroje. Povlakování v menších, ale i větších vrstvách nemá dobrý vliv na trvanlivost.^[9]

5.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny podle dosavadních podmínek, které vyhovovaly nejvíce pro používané povlaky.

Parametr	Velikost
Otáčky nástroje	30 min^{-1}
Otáčky obrobku	$0,577 \text{ min}^{-1}$
Řezná rychlost	15 m.min^{-1}
Posuv	$3 \text{ mm.ot}_{\text{obr}}^{-1}$
Chlazení	Chladicí emulze do místa řezu

Tabulka 8: Řezné podmínky experimentu

5.4 Metodika zkoumání trvanlivosti odvalovací frézy

Protože se ozubená kola vyráběla v dávkách, ve všech třech denních směnách a výrobní plán na sebe přímo nenavazoval, nebylo možné, abych u měření opotřebení byl stále. Proto byl vytvořen inspekční list (viz. Příloha 1), kde pracovníci po domluvě a vysvětlení zapisovali hodnoty opotřebení a pracovníci z metrologie zapisovali hodnoty drsnosti.

Při experimentu byla metoda krokování nástroje (viz kap.1.4.3.4). Rozměry frézy pro operaci hrubování dovozovaly krokování po pěti kusech na celou délku frézy. Tedy po pěti obrobených kusech byla fréza opotřebována na celé délce na stejnou hodnotu opotřebení. Poté byla fréza opět axiálně posunuta do první polohy a proces se opakoval. Při použití této metody tedy není trvanlivost měřena jako trvanlivost jednoho zubu a jeho povlaku, ale jako trvanlivost celé frézy.

5.4.1 Inspekční list

V hlavičce inspekčního listu bylo zapsáno číslo odvalovací frézy, kterou se provádělo obrábění při zapisování do inspekčního listu. Dále se zapisoval do dalšího řádku typ povlaku, který byl na fréze. Následovalo stručné vysvětlení měření.

Základní zapisovací část inspekčního listu se skládá z pěti sloupců pro zapisování hodnot:

První sloupec pro zapisování počtu obrobených kusů. Předepsán byl první a desátý kus, protože podle zkušeností byla fréza schopna na jednu trvanlivost povlaku obrobít více jak 10 kusů. Pro plynulý průběh opotřebení a z důvodu krokování po pěti obrobených kusech se měřilo opotřebení po každém desátém obrobeném ozubeném kole. Při větším počtu měření by se ubíral pracovní čas pracovníka, který by opotřebení musel často měřit. U posledních kusů

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

už pracovník měřil po každém kusu až do kritériálního opotřebení, které zapsal i s počtem obrobených kusů do inspekčního listu.

Ve druhém sloupci byly zapisovány pořadová čísla obrobeného kusu. Toto číslo bylo vyraženo na obou půlkách děleného kola. Zapsané číslo kusu v inspekčním listu sloužilo především pro vyhledání obrobeného kusu po měření opotřebení frézy pracovníkem metrologie, který na tomto kusu změřil drsnost boku zubu.

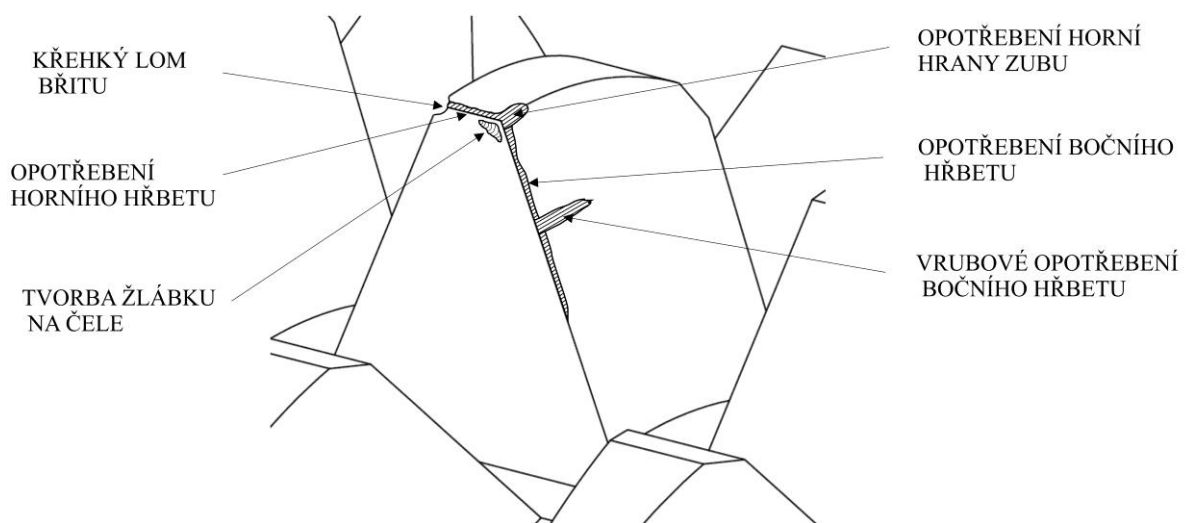
Třetí sloupec sloužil pro zapsání naměřené hodnoty opotřebení. Měřila se největší hodnota, která je ve většině případů v horní části zubu.

Do čtvrtého sloupce zapisoval hodnoty drsnosti pracovník metrologie po změření drsnosti boku zubu na obrobeném kusu podle čísla v inspekčním listu.

Pátý sloupec byl pouze informativní pro zápis poznámek, kdy se provádělo překrokování, nebo došlo k neočekávaným závadám.

5.4.2 Měření opotřebení nástroje

U odvalovacího obrábění dochází především k opotřebení hřbetů nástroje společně s horní hranou zubu. Měření se provádí v místě největšího opotřebení, které je právě na horní hraně zubu. Toto opotřebení je největší zřejmě z důvodu většího ohřátí hrany. Teplo zde má přístup ze dvou hran.



Obr. 36: Nejčastější opotřebení zubu odvalovací frézy

Kritériální hodnota opotřebení pro experiment, při dosažení požadovaných přesností a drsností, byla stanovena na hodnotu v rozmezí:

$$VB_{\text{krit}} = 0,13-0,15 \text{ mm.}$$

Samotné měření opotřebení bylo prováděno s Brinellovou lupou po obrobení určeného počtu ozubených kol. V lupě bylo použito měřítko s rozlišovací schopností 0,01 mm. Pro větší přesnost měření bylo prováděno na třech zubech frézy, které byly nejvíce v řezu, tedy na zubech, které byly co nejbližší rovině kolmé k ose otáčení obrobku.

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu



Obr. 37: Měření pomocí Brinellovy lupy

Měření opotřebení na odvalovací frézce je díky její konstrukci velice obtížné. Je nutné odjet s přísuvovou osou na maximální vzdálenost od obrobku, aby bylo možné přiložit lupu a odečíst hodnotu. Jednodušší i přesnější možnost je odepnutí trnu s nástrojem z vřetene a odečtení hodnoty opotřebení stabilně na stole. Tato možnost nebyla vhodná, protože by se prodlužovaly vedlejší časy dělníka, který obsluhoval stroje.

5.4.3 Měření drsnosti boku zubu

U ozubených kol je problematické změřit drsnost boku zubu, protože plochu boku zubu tvoří evolventa, tedy křivka. Většina měřících přístrojů je založena na měření drsnosti na rovných plochách. Proto byl pro měření drsnosti použit speciální dotykový drsnoměr Perthometer M1 od výrobce profilometrů Mahr. Tento přenosný přístroj pro měření drsnosti povrchu má speciálně upravené rameno snímače pro měření na křivkových plochách.

Oproti běžnému rameni má tento drsnoměr před snímacím hrotem tzv. smykadlo, které kopíruje tvar zubu. Zatímco smykadlo kopíruje přesný tvar zubu, hrot zůstává v konstantní vzdálenosti od povrchu a jeho pohybem se odměřuje mikroskopická drsnost povrchu.^[25]

Parametr	Rozměr
Měřicí rozsah	150 μm
Měřicí délky	1,75 mm / 5,6 mm / 17,5 mm
Volitelný počet měřících délek	1 až 5
Volitelný zkrácený Cut-off	0,25 mm / 0,8 mm / 2,5 mm
Parametry dle DIN,ISO,SEP	Ra, Rz, Rmax, Pc
Automatické normované nastavení přístroje	
Tisk protokolu s výsledky	

Tabulka 9: Parametry drsnoměru Perthometer M1^[26]

5 Navržení metodiky zkoumání trvanlivosti a drsnosti boku zubu

Pro měření drsnosti boku zubů byly nastaveny hodnoty měřicí délky 5,6 mm. Hodnoty měřících délek určují přesnost měření drsnosti. Čím delší je měřená délka, tím je přesnější aritmetický průměr naměřených drsností. V tomto případě byla měřicí délka omezena délkou površky boku zubu. Počet měřících délek byl zvolen co nejvyšší, tedy 5, aby byla dosažena také co možná největší přesnost měření. Volitelný zkrácený cut-off byl nastaven na hodnotu 0,8 mm. Poslední nastavovaná hodnota byl měřený základní parametr drsnosti. Měřena byla hodnota průměrné aritmetické odchylky povrchu R_a v normě ISO, protože je tato hodnota předepsána i na výrobním výkrese součásti.



Obr. 38: Nastavení drsnoměru při měření drsnosti boku zubu

Samotné měření bylo prováděno okamžitě po obrobení ozubeného kola. Nejprve bylo nutné očistit zuby od ulpělé třísky a chladicí kapaliny, které by mohly ovlivňovat měření drsnosti. Většinou stačilo použít tlakový vzduch. Ozubené kolo poté bylo umístěno pevně na stole, aby se zamezilo jeho pohybu. Měření bylo prováděno na dvou protilehlých zubech, ve většině případech se hodnota drsnosti lišila pouze v setinách, pokud se lišila v desetínách, byla zapsána vyšší naměřená hodnota.



Obr. 39: Drsnost na boku zubu (vlevo) a měření drsnosti pomocí sondy drsnoměru (vpravo)

6 Praktická část

6.1 Výsledky naměřených opotřebení v závislosti na povlaku

6.1.1 Povlak AlCrN

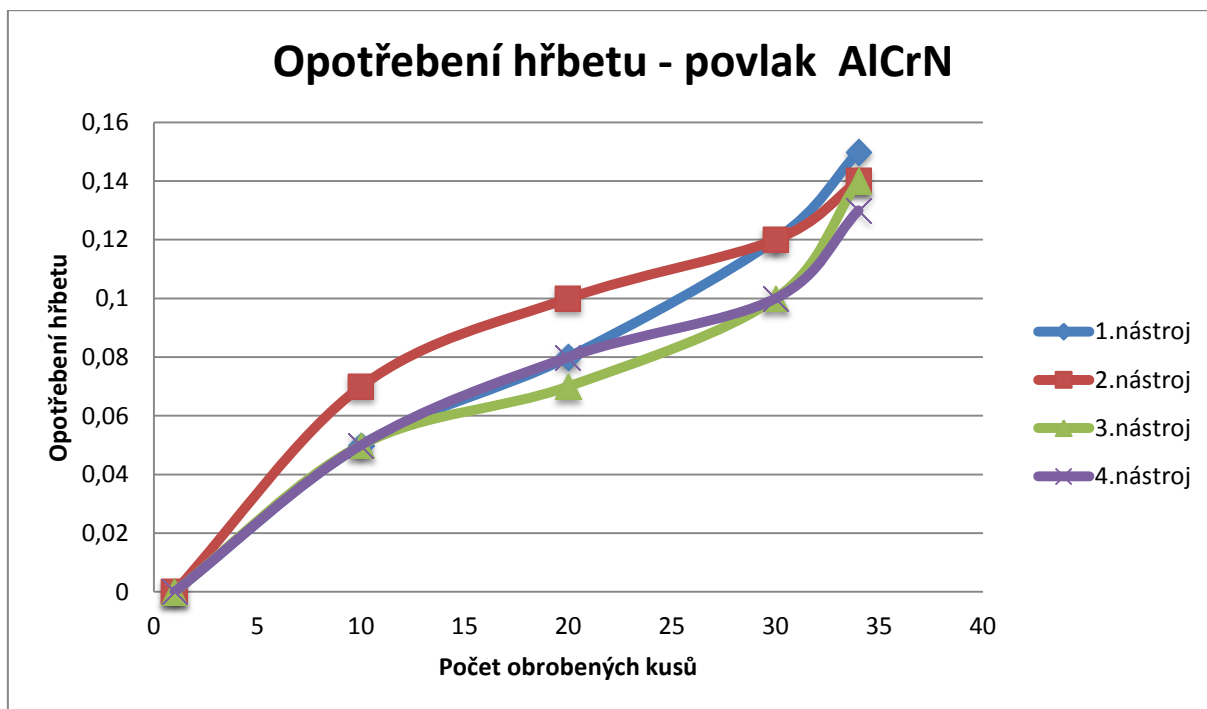
Prvním testovaným povlakem byl moderní povlak AlCrN, který firma používala již dříve a proto měla na skladě nástrojárny již připravené odvalovací frézy s tímto povlakem.



Obr. 40: Povlak AlCrN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	0	0	0	0
10	0,05	0,05	0,07	0,05
20	0,08	0,07	0,1	0,08
30	0,12	0,1	0,12	0,1
34	0,15	0,14	0,14	0,13

Tabulka 10: Naměřené hodnoty opotřebení u povlaku AlCrN



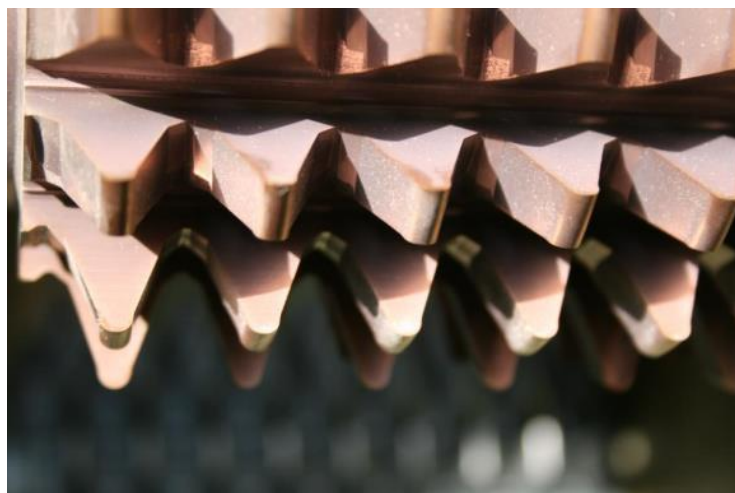
Graf 1: Průběh opotřebení hřbetu na obrobeneých kusech - povlak AlCrN

Už při prvním měření bylo vidět, že povlak AlCrN má díky své vysoké teplotní stabilitě a dobré adhezi vysokou výdrž a díky tomu je i malé opotřebení hřbetu. V grafu 1 jsou dobře patrné jednotlivé oblasti opotřebení, které byly popisovány v kapitole 2.1.5. Na začátku je vidět rychlé opotřebení hřbetu následované pomalejším opotřebením v důsledku abrazivního opotřebení. V závěru nastává urychlené opotřebení, kdy by docházelo k velkému opotřebení nástroje.

V tomto případě by bylo vhodné vyměnit nástroj při obrobení 30 kusů, kdy při dalším obrábění se projevuje rychlé opotřebení nástroje. Avšak díly se obráběly v dávkách po 17 kusech, proto je upřednostňována výroba celé dávky před opotřebením, pokud je možné dodržet stanovené parametry podle výkresu (především drsnost).

6 Praktická část

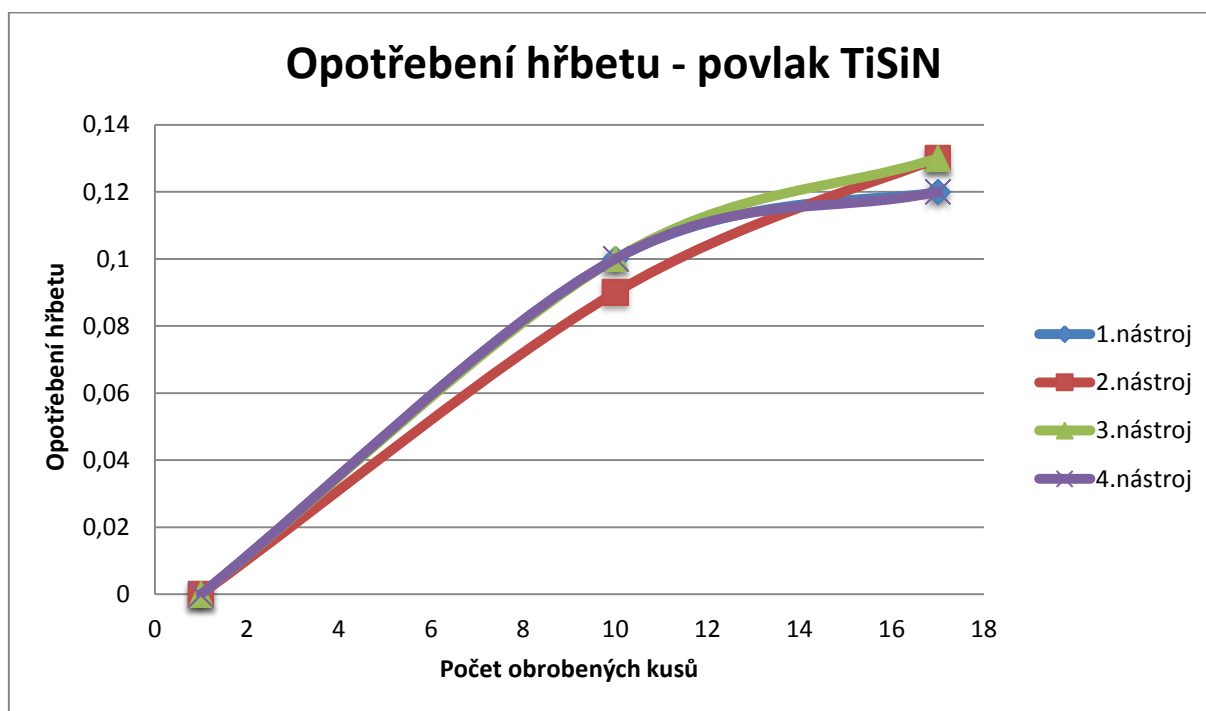
6.1.2 Povlak TiSiN



Obr. 41: Povlak TiSiN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	0	0	0	0
10	0,1	0,09	0,1	0,1
17	0,12	0,13	0,13	0,12

Tabulka 11: Naměřené hodnoty opotřebení hřbetu u povlaku TiSiN



Graf 2: : Průběh opotřebení hřbetu na obrobených kusech - povlak TiSiN

6 Praktická část

U nástroje s povlakem TiSiN docházelo k rychlému nástupu opotřebení již při prvních 10 obrobených kusech. Po obrobení první dávky 17 kusů bylo dosaženo spodní hranice kritického opotřebení a byla vyměněna fréza.

Protože byl graf sestaven z naměřených hodnot, které končily u 17. kusu, tedy byly přeměřeny pouze 2 hodnoty opotřebení, není patrný průběh opotřebení. Kdyby se neobrábělo na dávky, bylo by možné s nástrojem obrobit přibližně další čtyři kusy navíc, než by se dosáhlo horní hranice kritického opotřebení.

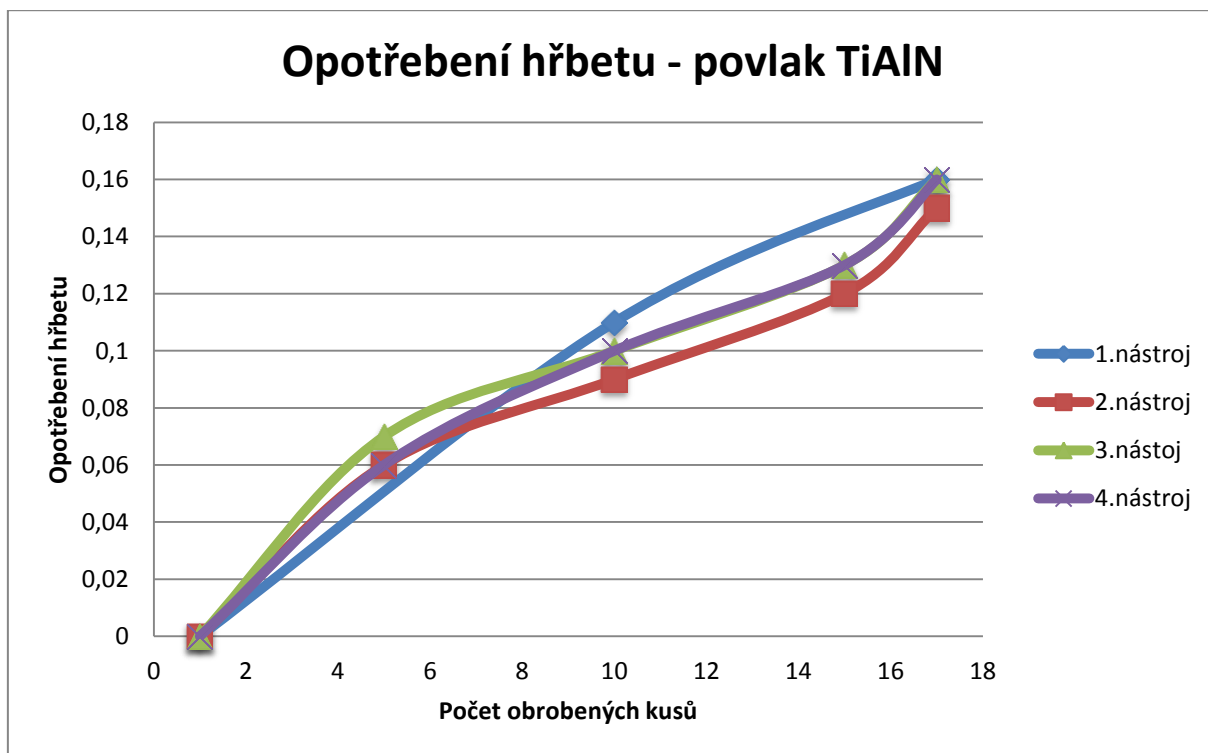
6.1.3 Povlak TiAlN



Obr. 42: Povlak TiAlN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	0	0	0	0
5	-	0,06	0,07	0,07
10	0,11	0,09	0,1	0,1
15	-	0,12	0,13	0,13
17	0,16	0,15	0,16	0,16

Tabulka 12: Naměřené hodnoty opotřebení hřbetu u povlaku TiAlN



Graf 3: Průběh opotřebení hřbetu na obrobených kusech - povlak TiAlN

První měření opotřebení u nástroje povlakovaného TiAlN se velice podobalo opotřebení u povlaku TiSiN. Také ihned na začátku obrábění došlo k nárůstu opotřebení a kritériální hodnoty bylo dosaženo již na konci první dávky. U většiny případů byla kritériální hodnota překročena, k překročení drsnosti dané výkresem však nedošlo.

Pro lepší zviditelnění průběhu opotřebení byl změněn způsob měření opotřebení a do inspekčního listu byly zaznamenávány obrobené kusy po každém pátém kuse. Díky tomu je viditelný tvar křivky podobný grafu 1 u povlaku AlCrN. Pouze s rozdílem, že k dosažení kritériální hodnoty opotřebení a lavinovému opotřebení dochází už u 17. kusu.

Naměřené hodnoty, a z nich vytvořené grafy, se podobají teoretické křivce průběhu opotřebení na čase z Obr. 21 s rozdílem, že v tomto experimentu bylo opotřebení závislé na počtech obrobených kusů. Počátek křivek má však mírnou směrnici, kde se dá předpokládat, že zde by se také křivky pohybovaly strměji vzhůru s počátečním opotřebením v oblasti A (viz. kap. 2.1.5). U povlaku TiSiN se dá předpokládat podobný průběh jako u povlaku TiAlN, s rozdílem, že na konci by pravděpodobně křivka nezačala tak strmě stoupat, protože by opotřebení nedosáhlo lavinového opotřebení v oblasti C (viz. kap. 2.1.5).

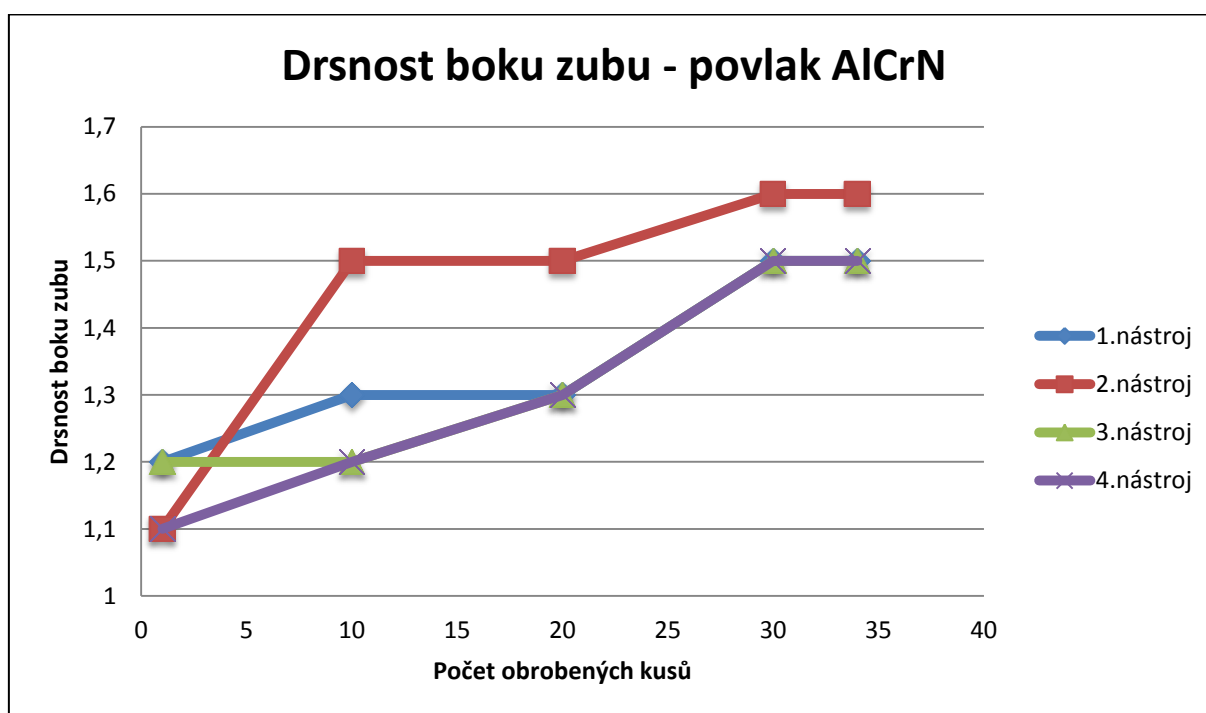
6 Praktická část

6.2 Výsledky naměřených drsností v závislosti na opotřebení nástroje

6.2.1 Povlak AlCrN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	1,2	1,1	1,2	1,1
10	1,3	1,5	1,2	1,2
20	1,3	1,5	1,3	1,3
30	1,5	1,6	1,5	1,5
34	1,5	1,6	1,5	1,5

Tabulka 13: Naměřené hodnoty drsnosti boku zubu u povlaku AlCrN



Graf 4: Průběh velikosti drsnosti boku zubu na obrobených kusech - povlak AlCrN

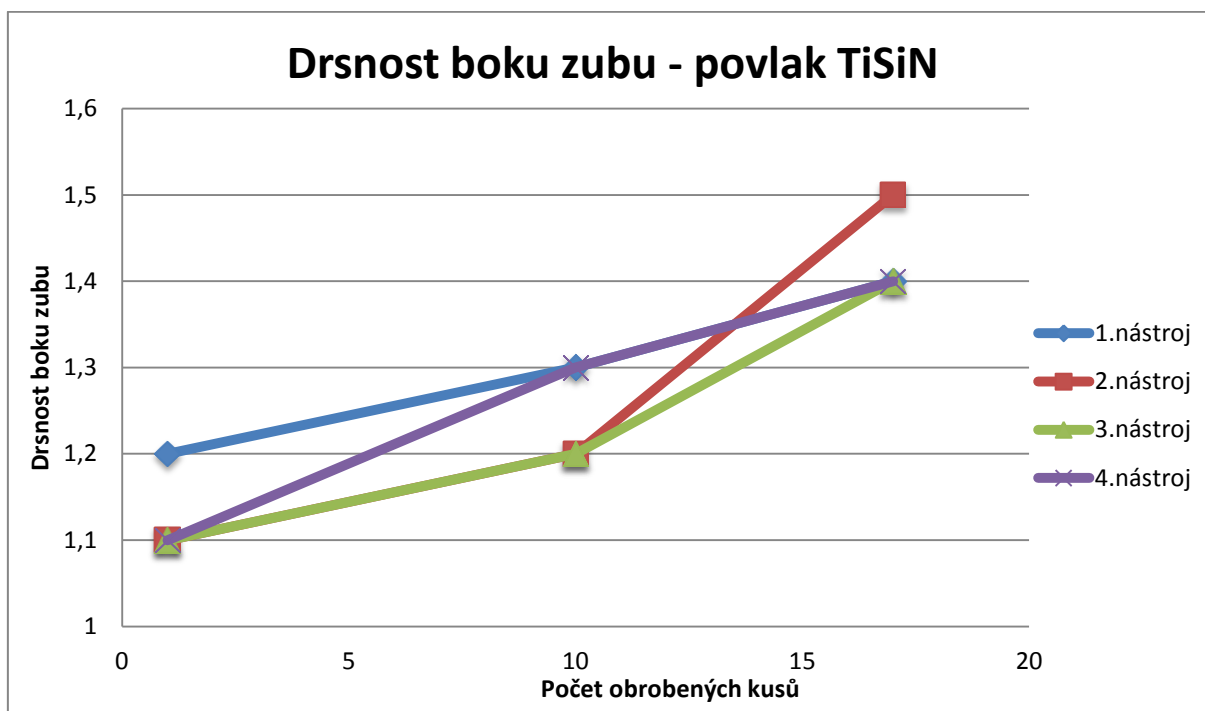
Průběh velikosti drsnosti boku zubu má u frézy s povlakem AlCrN skoro lineární průběh a při dosažení kritériální drsnosti se již pohybuje okolo drsnosti Ra1,6, což je předepsaná drsnost na výkrese součásti.

V Grafu 4 je také patrná jedna výchylka drsnosti. Během zkoušky druhého nástroje byl špatně utažen trn nástroje a došlo k okamžitému nárůstu drsnosti u prvních kusů, dokud nebyl nástroj opět správně upevněn. Po správném upevnění nástroje se drsnost vrátila zpět do lineárního průběhu, ale poslední kusy už se pohybovaly na hranici uznání kontrolou kvality.

6.2.2 Povlak TiSiN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	1,2	1,2	1,1	1,2
10	1,2	1,3	1,2	1,3
17	1,4	1,5	1,4	1,5

Tabulka 14: Naměřené hodnoty drsnosti boku zubu u povlaku TiSiN



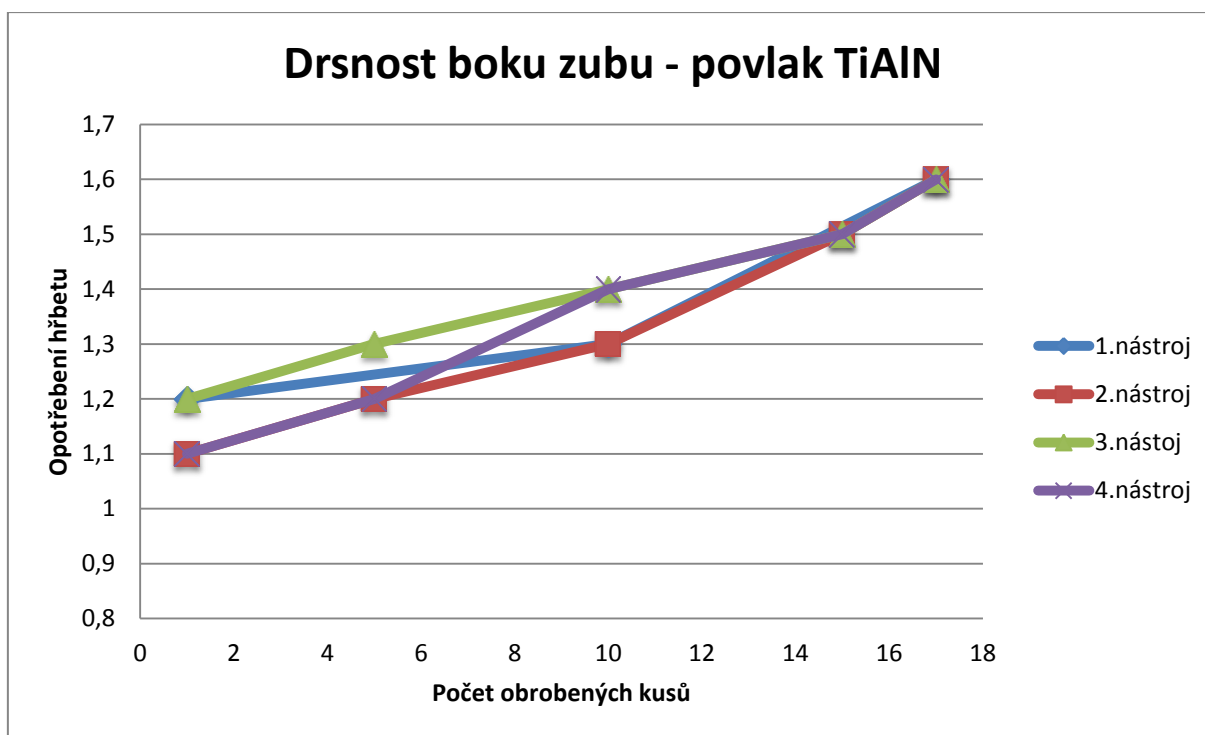
Graf 5: Průběh velikosti drsnosti boku zubu na obrobených kusech - povlak TiSiN

Stejně jako u měření opotřebení s povlakem TiSiN je průběh nárůstu drsnosti boku zubu pouze v hrubém měřítku kvůli malému počtu naměřených hodnot. I přes to je znatelné, že nárůst drsnosti má skoro lineární průběh jak tomu bylo i u předchozího povlaku. Hodnoty se pohybují při 17 kusech okolo drsnosti Ra1,4 a to hlavně díky tomu, že opotřebení bylo pouze na spodní hranici kritériálního opotřebení. Podle průběhu nárůstu drsnosti se dá předpokládat, že při horní hranici kritériálního opotřebení, tedy 0,15mm, by se pohybovala drsnost okolo Ra1,5.

6.2.3 Povlak TiAlN

Obrobené kusy	1.nástroj	2.nástroj	3.nástroj	4.nástroj
1	1,2	1,1	1,2	1,1
5	-	1,2	1,3	1,2
10	1,3	1,3	1,4	1,4
15	-	1,5	1,5	1,5
17	1,6	1,6	1,6	1,6

Tabulka 15: Naměřené hodnoty drsnosti boku zubu u povlaku TiAlN



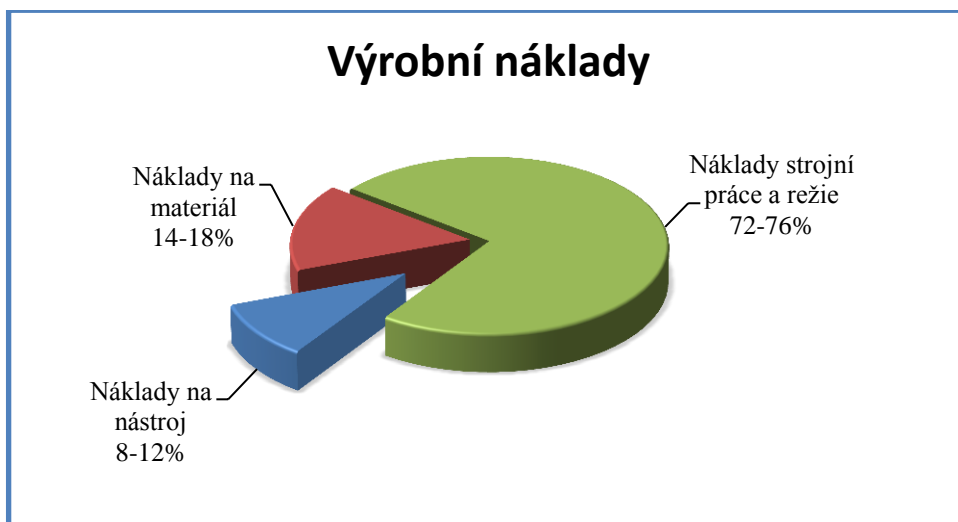
Graf 6: Průběh velikosti drsnosti boku zubu na obrobených kusech - povlak TiAlN

U měření drsnosti boku zubu u povlaku TiAlN je nejlépe vidět lineární nárůst drsnosti s počtem obrobených kusů, tedy i s opotřebením frézy s tímto povlakem. Při dokončení dávky drsnost dosahovala hranici povolené drsnosti boku zubu, zapříčiněno to bylo překročením kritériální hodnoty opotřebení hřbetu frézy.

6.3 Ekonomické zhodnocení použití povlaků

V současné době je snaha dosahovat co nejehospodárnějšího provozu při výrobě produktu. Dociluje se toho optimalizací jednotlivých nákladů výrobního procesu. Největší váha nákladů se nachází přímo v obráběcím procesu, v soustavě S-N-O-P. Největší procento nákladů má strojní práce a režie, ve kterých jsou zahrnuty odpisy stroje, energie a další režie a zároveň i mzda pracovníka. Náklady na materiál jsou otázkou obchodního oddělení, jak jsou schopni snížit nákupní cenu a tím zvýšit zisk firmy, nebo snížit cenu výsledného produktu a tak zvyšovat konkurenceschopnost firmy.

V první skupině nákladů se však nachází i optimalizace řezných podmínek, které zásadně mění čas operace a tím dochází i ke snížení nákladů. Změna řezných podmínek však má za následek i změnu v trvanlivosti nástroje, který patří do poslední skupiny nákladů. Zvýšením řezných podmínek dochází ke snížení nákladů strojní práce a režie, ale zároveň je potřeba použít speciální technologie u nástrojových nákladů, které zvýší náklady v její skupině. Tento fakt ukazuje, že je potřeba se zabývat náklady jak v nejvyšší sféře, tak i u těch nejnižších.



Graf 7: Výrobní náklady^[9,27]

Pokud se tedy zaměříme na optimalizaci nákladů na nástroj, je potřeba zvážit materiál nástroje a jeho konstrukci, tyto faktory určují hlavní náklady na nástroj. Volba materiálu se provádí podle obráběného materiálu a řezných podmínek. Pro snížení tepelného namáhání nástroje je potřeba zvolit vhodnou geometrii a utvářeče třísky.

V současné době však má čím dál tím větší míru z ekonomického hlediska povlakování nástroje. Povlaky jsou schopny zajistit navýšení řezných podmínek, zvýšení trvanlivosti a tím i prodloužit životnost nástroje oproti nepovlakovanému nástroji.

Opatření pro snížení časově závislých strojních nákladů	Opatření ke snížení nákladů na nástroj
zvýšení řezné rychlosti a posuvu	redukce řezné rychlosti, posuvu
zvýšení počtu chodů frézy	zvětšení počtu hřebenů a průměru frézy
snížení času pro upnutí a uvolnění obrobku	<u>povlakování čelní a hřbetní plochy</u>

Tabulka 16: Možnosti snížení nákladů u odvalovacího frézování^[9]

Pro ekonomické zhodnocení použití povlaků odvalovacích fréz pro firmu Wikov MGI bylo zapotřebí znát vstupní náklady nástroje a další režijní náklady. Po zjištění byla vytvořena Tabulka 16. Pořizovací cena, čas výměny nástroje, hodinová sazba stroje a životnost nástroje byly společné pro všechny tři povlaky, jednalo se tedy o fixní jednotky. Variabilní jednotky jako je počet obrobených kusů a cena povlakování byly pro každý povlak rozdílné.

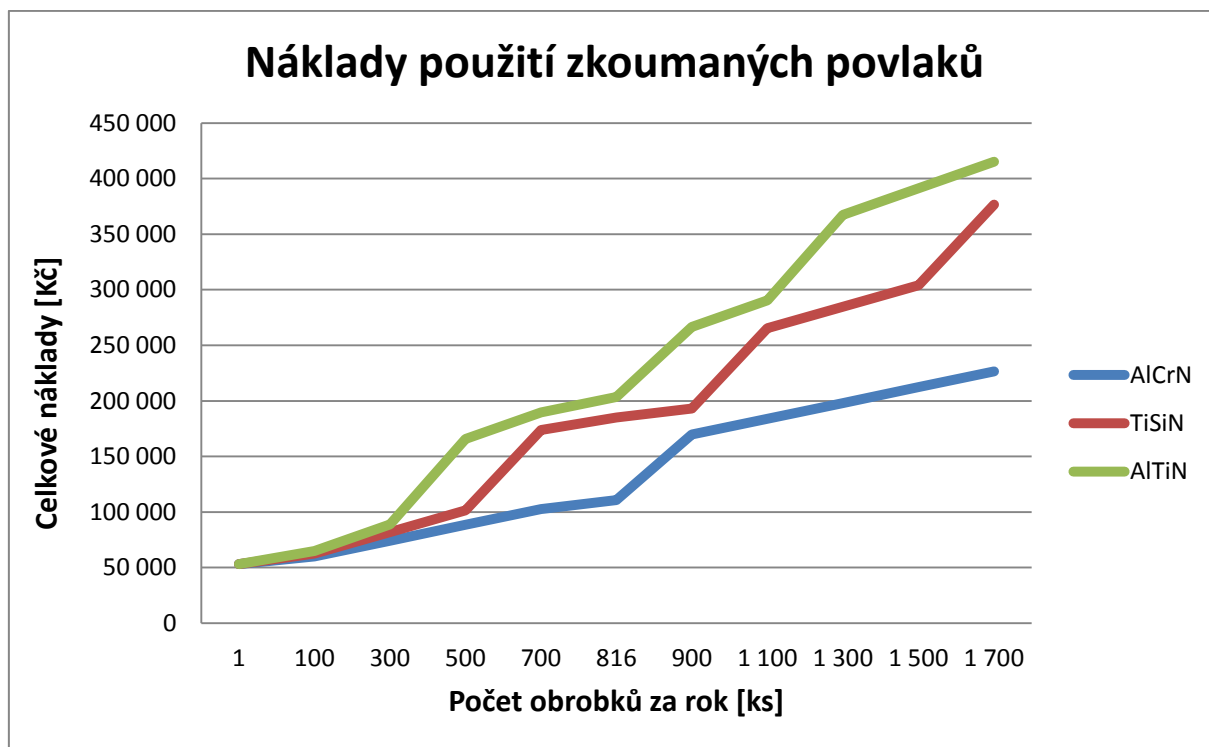
	Jednotky	Hodnoty		
Cena nového nástroje	Kč	53 000		
Životnost nástroje	-	25		
Typ povlaku	-	AlCrN	TiSiN	AlTiN
Cena povlakování	Kč	2 268	1 890	1 890
Počet obrobených kusů	ks	34	21	17
Počet obrobených kusů za životnost nástroje	ks	850	525	425
Přibližný počet obrobků za rok	ks/rok	816		
Potřebný počet fréz	ks	1	2	2
Počet výměn nástroje za rok	-	24	39	48
Výměna nástroje	min	5		
Hodinová sazba stroje	Kč/hod	1 700		
Celková doba výměn	hod	2	3	4
Náklady na výměny nástrojů	Kč	3 400	5 505	6 800
Náklady na nástroje	Kč	107 432	179 440	196 720
Celkové náklady	Kč	110 832	184 945	203 520

Tabulka 17: Ekonomické zhodnocení použití vybraných povlaků

Z celkových nákladů je zřejmé, že ikdyž je cena povlaku AlCrN nejvyšší, tak v celkových nákladech vychází jasně nejlépe. Velkou váhu na tomto výsledku má to, že s povlakem AlCrN je možné obrobit znatelně více kusů a díky tomu postačí použití pouze jedné nové odvalovací frézy. Tento výsledek je možný pouze pokud bude životnost frézy více jak 25 přebroušení, protože životnost frézy je při tomto předpokladu velice blízko přibližnému počtu kusů obrobků za rok. Však i při pořízení druhého nástroje by se náklady pohybovaly pod hranicí nejbližšího zkoumaného povlaku.

Povlaky TiSiN a TiAlN mají sice nižší cenu, než AlCrN, ale v jejich případě je nutné častěji přebroušovat frézu a je potřeba pořízení dvou nových nástrojů. Zároveň se do celkových nákladů promítají i náklady na častější výměnu nástroje, které mají také svou váhu.

V grafu 8 jsou vytvořeny křivky nákladů při změně výrobních dávek, resp. počtu obrobků za rok. Trendy nárůstu nákladů jsou jasně znatelné. Každý zlom na křivce znamená pořízení nového nástroje. Křivky povlaku TiSiN a TiAlN se pohybují velice podobně a oproti povlaku AlCrN stoupají strměji a s tím i náklady.



Graf 8: Náklady použití zkoumaných povlaků

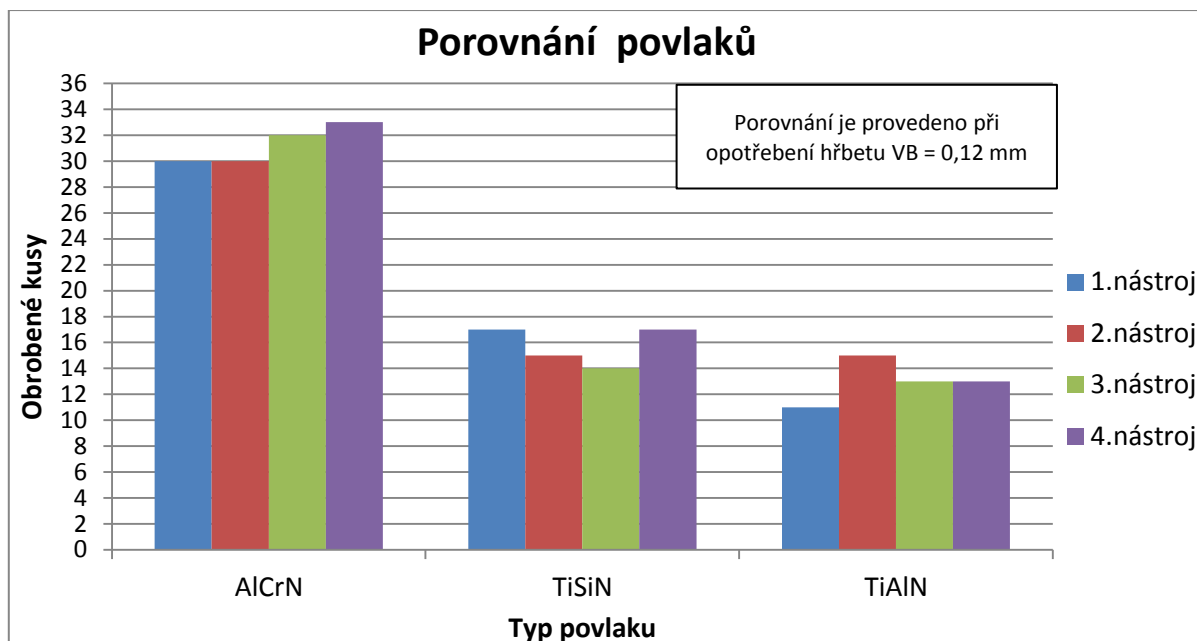
Zhodnocení a závěr

Tato práce měla za cíl shrnutí poznatků o technologiích výroby ozubených kol s čelním ozubením, se stručným popisem technologie dělicího a odvalovacího způsobu a podrobnějším přehledem o technologii odvalovacího frézování. V další části byl rozebrán pojem trvanlivosti nástroje, s tím spojené opotřebení nástroje a jeho měření a Taylorův vztah pro výpočet trvanlivosti. Dalším cílem bylo popsání povlakování nástrojů, jeho historii a technologie povlakování. Závěrem teoretické části bylo rozebrání pojmu drsnost povrchu a jeho měření.

V praktické části je nejprve popsáno navržení metodiky zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti boku zubu obrobku. Popsány jsou materiály a rozměry nástroje a obrobku, typy použitých povlaků a jejich vlastnosti a stroj, na kterém se obrábělo. Dále je popsán inspekční list použitý pro zapisování naměřených hodnot opotřebení a drsnosti a pro princip měření opotřebení a drsnosti. Druhá polovina praktické části se věnuje samotným naměřeným hodnotám opotřebení a drsnosti. V závěru praktické části je provedeno ekonomické zhodnocení použití povlaků.

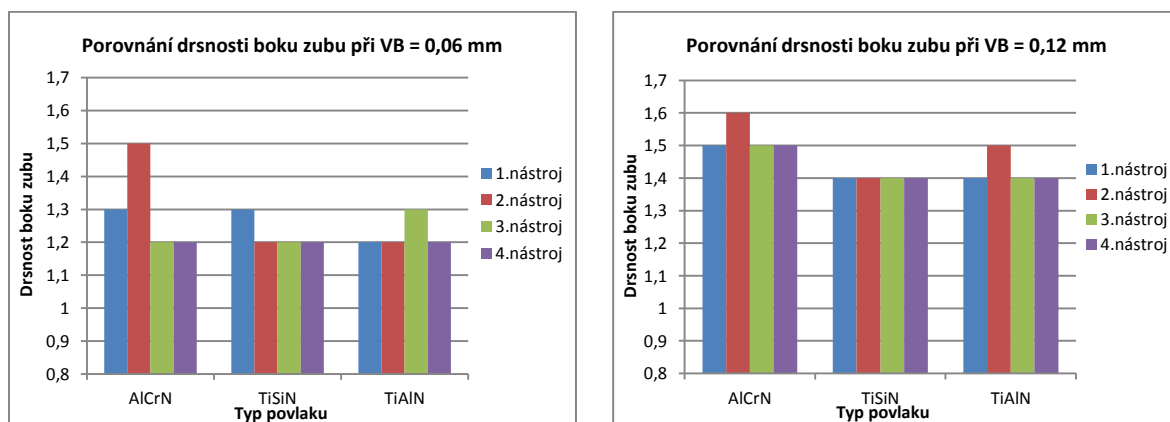
První zkoumaný povlak AlCrN měl velice dobré výsledky, když při opotřebení hřbetu odvalovací frézy na horní hranici kritériálního opotřebení dokázala tato fréza obrobit 34 ozubených kol, tedy 2 výrobní dávky. K tomuto výsledku zřejmě přispěla velká oxidická i tepelná stálost povlaku. Druhý povlak TiSiN sice disponuje ve vlastnostech vysokou tvrdostí, ale při obrobení jedné výrobní dávky už opotřebení hřbetu dosahovalo dolní hranice kritériálního opotřebení. Díky původně nevhodně zvolenému počtu měření a zapisování do inspekčního listu nebylo možné odečíst spolehlivě další průběh opotřebení u tohoto povlaku. Podle rychlosti opotřebení by se dalo předpokládat, že horní hranice opotřebení by se dosáhlo asi při 21 obrobených kusech. Třetí zkoumaný povlak vykazoval nejhorší vlastnosti, když při dokončení první dávky dosáhl horní hranice kritériálního opotřebení.

Při srovnání opotřebení na hodnotě $VB = 0,12$ mm dokázal nástroj s povlakem AlCrN obrobit v průměru 31,25 kusů, nástroj s povlakem TiSiN 15,75 kusů a nástroj s povlakem TiAlN 13 kusů. V přepočtu tedy povlak AlCrN zajišťuje trvanlivost nástroji až o 140% lepší než trvanlivost s povlakem TiAlN a o 98% lepší trvanlivost než u nástroje s povlakem TiSiN.



Graf 9: Porovnání zkoumaných povlaků

Měření drsnosti boku zubu prokázalo, že typ povlaku má pouze malý vliv, respektive nemá žádný vliv na drsnost. Měření drsnosti boku zubu prokázalo, že opotřebení odvalovací frézy má podstatný vliv na drsnost: zvětšení opotřebení z 0,06 mm do 0,12 mm způsobilo zvětšení drsnosti o 16 % z Ra 1,2 na Ra 1,4.



Graf 10: Porovnání drsnosti boku zubu při VB = 0,06 mm a VB = 0,12 mm

Z ekonomického zhodnocení výběru povlaku vyplývá, že nejnižší roční náklady zajistí povlak AlCrN se 110 832 Kč v porovnání s povlakem TiSiN, kde jsou náklady o 74 113 Kč vyšší, a TiAlN, při jehož používání jsou náklady o 92 688 Kč ročně vyšší. Při snížení nebo navýšení výroby zajistí povlak AlCrN stále nižší náklady oproti povlakům TiSiN a TiAlN.

Z naměřených a zjištěných hodnot bych doporučoval používání povlaku AlCrN, který dosahuje téměř dvojnásobných výsledků trvanlivosti při zvolených řezných podmínkách, než zbylé dva povlaky ve výrobních podmínkách firmy Wikov MGI a.s.. Optimalizací řezných podmínek by se jistě daly zvýšit trvanlivosti i povlaků TiSiN a TiAlN, pro tyto řezné podmínky však proti AlCrN nevyhovují.

Citace

- ¹ HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní součásti*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2000, viii, 198 s. Edice strojaře. ISBN 80-722-6202-5.
- ² GlobalSpec: 40.9: Gear Lubricants. *40.9: Gear Lubricants* [online]. 2002, 5/2013 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com/reference/45654/203279/40-9-gear-lubricants>
- ³ *Technologie frézování: Pracovní listy* [online]. Šumperk, 2007 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC_fr.pdf
- ⁴ Základní druhy dělení s dělicími přístroji. *Tumlikovo: Metal cutting technologies* [online]. 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/delici-pristroje-druhy-deleni/>
- ⁵ *Kotoučovou frézou: Princip výroby ozubených kol dělicím způsobem* [online]. 2010, 7.2.2013 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/ozubeni/frezovanim/kotoucovou/>
- ⁶ MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007c1999, 3 sv. (80, 84, 88 s.). ISBN 978-80-01-03752-2.
- ⁷ Technologie 1: Technologie obrábění - 2.část. In: HUMÁR, Anton. *Ústav strojírenské technologie VUT Brno: Obor technologie obrábění* [online]. VUT Brno, 2004 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- ⁸ MAIURI, T.J. Hob Tool Life: Technology update. In: *Gear Technology* [online]. 2009 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.geartechnology.com/issues/0309x/maiuri.pdf>
- ⁹ MRKVICA, Ivan. Současné trendy v obrábění ozubených kol: Učební text. In: *Současné trendy v obrábění ozubených kol* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.346.vsb.cz/Mrkvica%20-%20Sou%C4%8Dasn%C3%A9%20trendy%20v%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20ozuben%C3%BDch%20kol.pdf>
- ¹⁰ *Technologie obrábění: 1. díl*. Praha: ČVUT, 2000, 79 s. ISBN 80-010-2091-6.
- ¹¹ Pramet - Příručka obrábění. 2004. 101 s.
- ¹² Hoffmann Group + IWU (Fraunhofer Institut), Chemnitz (Deutschland). Příručka obrábění GARANT. 2005. 264 s. Vydání kat.34
- ¹³ ATeam: Zkoušky trvanlivosti ostří. *FS ZČU: Oddělení povrchového inženýrství* [online]. 2010 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/trvanlivost.html>
- ¹⁴ POPOV, Alexey. Teorie obrábění: Opotřebení a trvanlivost řezných nástrojů 2.část. *TechnoMat* [online]. 2012 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.techno-mat.cz/data/katedry/kom/KOM_TO_PR_12_CZE_Popop_Opotrebeni_reznych_nastroju_%282.%20cast%29.pdf

-
- ¹⁵ HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- ¹⁶ Technologie 1: Technologie obrábění - 1.část. In: HUMÁR, Anton. *Ústav strojírenské technologie VUT Brno: Obor technologie obrábění* [online]. VUT Brno, 2003 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- ¹⁷ HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, s.r.o, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- ¹⁸ FAJT, Josef a Miroslav KESL. Možnosti zvyšování trvanlivosti nástrojů u výrobce. In: *Metal2012* [online]. 2011 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_11/lists/papers/1072.pdf
- ¹⁹ CZECHCOATING. Povlakování metodou PVD: Komplexní servis obráběcích a tvářecích nástrojů. Dolní Bečva, 2010.
- ²⁰ JAŠKO, M. *Trvanlivost a životnost řezných nástrojů*. Mělník, 2009. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz/objekty/trvanlivost-a-zivotnost.pdf>. Ročníková práce. Trvanlivost a životnost řezných nástrojů Integrovaná Střední škola technická Mělník.
- ²¹ PASTOR, H., BROZEK, V. Chemické povlakování z plynné fáze. *Pokroky práškové metalurgie VÚPM*. 1979, 4, s. 289-299.
- ²² Tenké vrstvy. In: *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. 2007 [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- ²³ ČSN EN ISO 4287. Struktura povrchu: Profilová metoda - termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999. vyd. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- ²⁴ Strojírenská technologie. In: *Strojírenská technologie: část 1*. [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- ²⁵ *Gear technology: The journal of gear manufacturing*. Elk Grove Village: Gear Technology, 1997, June/August. ISSN 07436858.
- ²⁶ Drsnoměry a vzorkovnice drsnosti. UNIMETRA. *Unimetra s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/100_1.pdf
- ²⁷ QUINTO, Dennis T. PVD coatings, cutting tools and workpiece: Materials in machining. In: *SECA: Ceratizit EcoCut* [online]. 2011 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.uscti.com/u_pages/publications/pdfs/ItemMPVDCoatingsEtcInMachiningSECA.pdf

Přílohy

Příloha 1: 12x inspekční list diplomové práce